

学位論文

産業副産物を起源とする硬化体の
プレキャストコンクリートへの適用に関する研究

2023年 3月

畑 実

目 次

第1章 序論

1. 1	まえがき	1
1. 2	既往の研究	2
1. 3	研究の目的	3
1. 4	要求性能	4
1. 5	本論文の概要・構成	5
	参考文献【第1章】	7

第2章 IBPM コンクリートの圧縮強度に及ぼす材料と種類および配合の影響

2. 1	まえがき	9
2. 2	モルタルの実験方法	9
2. 2. 1	使用材料および配合	9
2. 2. 2	供試体の制作方法と養生方法	12
2. 2. 3	圧縮強度試験	14
2. 2. 4	円柱供試体の硫酸浸漬試験	17
2. 2. 5	凝結時間	20
2. 2. 6	硬化のメカニズム（水和物の同定）	22
2. 2. 7	フライアッシュの影響	25
2. 3	コンクリートの実験方法	28
2. 3. 1	コンクリート配合	28
2. 3. 2	遠心成形と振動成形	28
2. 3. 3	遠心供試体の硫酸浸漬試験	34
2. 3. 4	長期強度特性	38
2. 4	高強度化の検討	40
2. 4. 1	使用材料および配合	40
2. 4. 2	供試体の作製方法	41
2. 4. 3	養生方法	42
2. 4. 4	圧縮強度と水結合材比	42
2. 5	まとめ	45
	参考文献【第2章】	48

第3章 IBPM コンクリートの耐久性

3. 1	まえがき	49
3. 2	収縮性状	50
3. 2. 1	自己収縮	50
3. 2. 2	拘束ひび割れ	54
3. 2. 3	乾燥収縮	56
3. 3	耐硫酸性	57
3. 4	耐塩害性 (塩化物イオン遮塩性)	61
3. 5	中性化抵抗性	63
3. 6	凍結融解抵抗性	79
3. 7	すり減り抵抗性	82
3. 8	電子顕微鏡による水和組成観察	83
3. 9	細孔径分布	85
3. 10	アルカリ骨材反応試験	87
3. 11	まとめ	103
	参考文献【第3章】	105

第4章 RC 構造体の曲げ耐力と変形性能

4. 1	まえがき	107
4. 2	RC 梁の曲げ試験	107
4. 2. 1	実験方法	107
(1)	使用材料および配合	107
(2)	練り混ぜ方法および養生条件	108
(3)	RC 梁の作製方法	108
(4)	曲げ試験方法	110
4. 2. 2	実験結果および考察	110
(1)	コンクリートの性状	110
(2)	曲げ試験結果	110
4. 3	まとめ	112
	参考文献【第4章】	113

第5章 プレキャストコンクリート製品への適用

5. 1	まえがき	114
5. 2	遠心成形方法の概要	114
5. 3	ヒューム管（開削管）の試作実験	114
5. 3. 1	使用材料および配合	114
5. 3. 2	フレッシュ性状	115
5. 3. 3	実製品工場での製造実験	117
5. 3. 4	ヒューム管（開削管）の耐荷性能に関する実験結果	117
5. 4	PCa 製品への適用	120
5. 5	マンホールへの適用	123
5. 6	ヒューム管（開削管）への適用	125
5. 7	ヒューム管（推進管）への適用	127
5. 8	セグメントへの適用	129
5. 9	ボックスカルバートへの適用	134
5. 9. 1	使用材料および調合	134
5. 9. 2	ボックスカルバートの作製方法	134
5. 9. 3	外圧試験方法	134
5. 9. 4	フレッシュコンクリートと外圧試験結果	135
5. 10	流下性能	142
5. 10. 1	水理実験の概要	142
5. 10. 2	粗度係数の計算方法	144
5. 10. 3	実験結果および考察	145
5. 11	環境負荷低減効果	146
5. 11. 1	産業副産物の混入量	146
5. 11. 2	低炭素化（CO ₂ 排出量の削減率）	146
5. 12	まとめ	149
	参考文献【第5章】	151

第6章 結論

6. 1	各章のまとめ	152
6. 2	今後の課題と展望	156

謝辞	157
----	-----

第 1 章 序論

1. 1 まえがき

我が国では、人口減少や少子高齢化社会の進展により、建設業界においても労働者人口が急速に減少している。また、高度経済成長期に建設された多くのインフラが老朽化し、その対応が重要な課題となっている。このような状況を踏まえて、施工の効率が良く高品質で、高耐久性化が期待されるプレキャストコンクリート（以降 PCa）製品への需要が高まっている。

また、鉄筋コンクリート製の下水道管（以降、ヒューム管）においては国内の急速なインフラ整備に伴って普及し、長年に亘り国民の良質な日常生活を支えて来た。ヒューム管は遠心成形によって製造され、高強度、高緻密、高耐久なコンクリート製品として、多くの信頼と実績を積み上げてきたことでも知られている。ヒューム管の場合、地下構造物のため湿潤環境下にあり、内面には水が流れていることから、コンクリートには適した環境にあると考えられていた。しかし、近年ではヒューム管の早期腐食劣化が顕在化し、これが重度の場合には道路陥没事故を引き起こし、大きな社会問題にまで発展した事例も報告されている。この腐食劣化の原因は、ヒューム管内に硫化水素が発生してコンクリートが激しい硫酸劣化に至るものである¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。

コンクリートが硫酸劣化するメカニズムの代表的なものは以下の化学式で表される。



セメント硬化体中の水酸化カルシウム（ Ca(OH)_2 ）が硫酸と反応して脆弱な二水石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）に変化するためとされる⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾。このため、耐硫酸性能を向上させるためには、セメントの使用量を少なくしてフライアッシュや高炉スラグ微粉末などの混和材を積極的に使用することが有効である。

一方では、地球温暖化が進行しており、異常気象による干ばつや台風の大型化などを引き起こし、ゲリラ豪雨や線状降水帯などにより、未曾有の大災害を世界各地に発生させている。この対策として脱炭素化が必須であり、世界規模で CO_2 排出量の削減に向けた取組がなされるようになった。コンクリート分野においても地球環境負荷低減を図ることが重要な課題となっており、製造過程での二酸化炭素（ CO_2 ）排出量の多いセメントの使用量を削減することや、産業副産物をコンクリート材料として有効に活用することなどは、この課題解決の有効な方策であると考えられている。

以上の観点から、耐硫酸性や耐塩害性などに優れ 100 年級の高耐久性を有し、 CO_2 排出量の削減による脱炭素化やゼロエミッションに貢献できる硬化体を PCa 製品に適用することを目標として、本研究に着手した。

1.2 既往の研究

セメントを全く使用せずにフライアッシュや高炉スラグ微粉末を主材料とし、アルカリ刺激材には消石灰、生コンスラッジ、セメント、無水石膏、二水石膏などを使用した研究報告がある。例えば、フライアッシュと高炉スラグ微粉末および無水石膏を結合材とし、アルカリ刺激材の種類の影響を比較した研究⁹⁾。フライアッシュを主材料とし、高炉スラグ微粉末と二水石膏を加えた W/P25%のコンクリートについての研究¹⁰⁾。高炉スラグ微粉末を主材料として排煙脱硫石膏と水酸化カルシウムを添加した研究¹¹⁾がある。また、セメントを使用しないことで知られているジオポリマー硬化体の研究¹²⁾¹³⁾では、一部で製品化もされているが、フレッシュ時の可使用時間が短く取り扱いが難しいことや、高価であることなどの問題があり、広く普及していないのが現状である。このように、セメントを使用しないコンクリートの研究事例¹⁴⁾は少なくないが、PCa製品、特にヒューム管の製造に適用しようとする試みは希少である。

これらのことから、産業副産物を混和材として多量に用いることで、セメント使用量を抑制する取り組みがなされている。高炉スラグ微粉末やフライアッシュをセメントに置換する混和材としての使用方法のほか、近年では、これらの産業副産物の使用量を飛躍的に増加させてセメントを全く使用しない結合材をPCa製品に適用する研究¹⁴⁻²¹⁾も行われている。例えば、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用い、アルカリ刺激材として水ガラスを用いたジオポリマーの研究が進められており、オーストラリアでは空港の舗装や関連施設に適用された事例²²⁾が報告されている。国内では、道路用境界ブロック²³⁾や鉄道まくらぎ²⁴⁾への適用事例などが報告されている。また、アルカリ刺激材として水酸化カルシウムや膨張材を使用し、高炉スラグ微粉末を刺激材で硬化させるコンクリートをシールドトンネル用のセグメントに適用する研究¹⁴⁾も報告されている。

なお、本研究において、セメントを使わないコンクリートの技術は、「セメントがまだ無い時代の優れた技術」として、先人の知恵や経験、歴史から学んだことも事実である。まさに温故知新である。

そのひとつは、古代ローマで誕生したローマンコンクリートである。今から2000年前のローマでは火山が噴火し、火山灰が街中に溢れていたとされる。そこで誕生したのがローマンコンクリートであることは、あまりにも有名である。ローマンコンクリートは火山灰と火山石を活用し、『石灰』と海水とを練り混ぜて硬化させたものである。当時の歴史的建造物やインフラ整備には、ローマンコンクリートが



コロッセオ（イタリア）*1



万里の長城（中国）*2

<https://tabicoffret.com/article/72900/indexhtml>より転載*1

<https://grapee.jp/231375>より転載*2

写真 1-1 先人の優れた知恵と技術によって創建された建造物

用いられたと言われている。

ローマンコンクリートに使われた火山灰は、フライアッシュと類似し、シリカ (SiO_2) とアルミナ (Al_2O_3) 成分を多く含んでおり、これが水酸化カルシウム：消石灰 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) と水に混合されると、ポズラン反応によって長期強度が増進する性質を示す。

もうひとつは、古代中国。紀元前 250 年頃に万里の長城が建設された。万里の長城には石積みや煉瓦積みの部分がある。当時はセメントがまだ無いため、煉瓦を積み上げる際に、煉瓦を接着させるための目地には『石灰』を使ったモルタルが用いられていたことが言い伝えられている。

両者は共に悠久の時を経た現在でも、堅牢な状態にあることを顕示している。

1.3 研究の目的

近年では、セメントを使用しないコンクリートの PCa 製品への適用が各機関で検討されているが、まだ研究事例は少なく、今後の普及のためには、さらなる検討が必要である。特に、この種のコンクリートの配合と強度の関係や耐久性に関しては十分に把握されていない現状にある。さらに、多種多様な PCa 製品への適用性を検討し、普及を図ることは、コンクリート分野における環境負荷低減や長寿命化に有効であると考えられる。

当初、著者らは耐硫酸性を有するヒューム管の開発を目的とし、セメントを全く使用せずにフライアッシュと高炉スラグ微粉末を主材料とするセメント代替の新たな結合材の研究に着手した。すなわち、フライアッシュと高炉スラグ微粉末を主材料とし、下水汚泥焼却灰の粒度調整灰²⁵⁾およびシリカフェームを加えた 4 種類の産業副産物を用い、これに膨張材とアルカリ刺激材を加えた合計 6 種類の材料による結合材を用いた硬化体 (Industrial By-Product Materials : 以降 IBPM) の研究を行ってきた。そして一連の研究から、IBPM コンクリートの優れた耐硫酸性について報告してきた²⁶⁾²⁷⁾。すなわち、遠心成形した IBPM コンクリートを 5% 硫酸水溶液に 112 日間浸漬した結果、質量減少率は普通ポルトランドセメントの 1/10 以下であり、高い耐硫酸性を有していることを示した。さらに、IBPM を用いてヒューム管の実物大供試体を製造して載荷試験を行い、製品規格を満足する耐荷力を有することを報告した。すなわち、IBPM 製ヒューム管について、JSWAS A-1 に準拠した外圧試験を行い、ひび割れ荷重と破壊荷重は規格値を十分に満足することを示した。

このように IBPM のヒューム管への適用について検討を行ってきたが、今後、下水道管への実用化を図るためには、流水特性を把握することが必要であることを課題とした。

一方、IBPM の初期強度を確保するためには蒸気養生が有効である²⁶⁾²⁷⁾ことから、ヒューム管に限らず様々な PCa 製品への適用を検討することは、コンクリート分野における環境負荷低減および合理化施工を推進するために有意義であると考えられる。

以上のような観点から、本研究では、IBPM を用いたヒューム管の実用化を図ると共に、様々な PCa 製品への適用も視野に入れた検討を行うこととした。すなわち、IBPM の構成材料および混合比率が硬化体の圧縮強度に及ぼす影響についてモルタル実験により検討するとともに、ヒューム管の流水特性について検討した。さらに、IBPM を用いた PCa 鉄筋コンクリート部材の曲げ性状について、実験により検討した。この時点では、IBPM コンクリートの目標強度は、ヒューム管を含む多くのプレキャスト製品で採用されている $40\text{N}/\text{mm}^2$ 程度 (材齢 28 日) とした。その結果、蒸気養生を行うことで圧縮強度が $40\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の IBPM コンクリートの製造が可能であることを示した。さらに、PCa ヒューム管 (開削

管) の実物大供試体を作製して耐荷性能と流水性能の測定を行い、下水道管への適用が十分可能であることを示した。

このような背景を踏まえて、本研究ではさらに、IBPM コンクリートを様々な PCa 製品に適用することを目標とした。具体的には、様々な PCa 製品へ適用することを想定し、圧縮強度が 30~80N/mm² の強度範囲において、IBPM コンクリートの水結合材比 (W/B) と圧縮強度 (材齢 14 日) の関係について実験により検討した。耐久性の検討においては、各種 PCa 製品の用途や環境条件に応じて要求される収縮特性 (自己収縮, 乾燥収縮), 硫酸抵抗性, 塩化物イオン遮蔽性, 耐摩耗性, 凍結融解抵抗性について実験により検討した。また、フライアッシュの品質変動が IBPM モルタルの圧縮強度に及ぼす影響についても検討した。

一方、IBPM コンクリートの PCa 製品への適用例として、ボックスカルバート、セグメント、ヒューム管 (開削管, 推進管), マンホールを対象とし、各 PCa 製品の実物大供試体を試作するとともに、各製品規格に基づく試験により耐荷性能の評価を行った。

1.4 要求性能

各種 PCa への要求性能を表 1-1-1 に示す。要求性能は、最も必要とされる性能を重度、標準的に備えていなければならない性能を中度、適用場所によっては要求されない性能を軽度として区分した。また、用途ではボックスカルバートの地下道 (歩道, 車道), 雨水貯留槽や地下共同溝を除いて、下水排水路と雨水排水路、環境条件では内陸部と沿岸部に区分して表現した。

IBPM コンクリートによる PCa は、Non-AE コンクリートとして地下構造物への適用を想定している。このため、IBPM コンクリート製 PCa の耐荷性能や流水性能、IBPM コンクリートの収縮特性 (自己収縮, 乾燥収縮) 硫酸抵抗性, 塩害抵抗性, 耐摩耗性など、地下構造物としての要求性能に着目した研究を優先して行った。また、凍結融解作用を受けるおそれのある環境へ適用する場合を想定して、特殊混和材を用いた凍結融解抵抗性を確認した。

表 1-1 要求性能

区分	用途	プレキャスト コンクリート	環境条件	要求性能				
				耐荷性能	耐塩害性	耐硫酸性	耐摩耗性	流水性能
1	下水道排水路	ボックスカルバート セグメント 推進管 ヒューム管	内陸部	◎	△	◎	◎	◎
			沿岸部	◎	◎	◎	◎	◎
2	雨水排水路		内陸部	◎	△	△	◎	◎
			沿岸部	◎	◎	△	◎	◎
3	地下道 (歩道・車道)	ボックスカルバート	内陸部	◎	△	△	◎	△
			沿岸部	◎	◎	△	◎	△
4	貯留水槽 地下共同溝		内陸部	◎	△	○	◎	○
			沿岸部	◎	◎	○	◎	○
5	下水道施設		内陸部	◎	△	◎	○	△
			沿岸部	◎	◎	◎	○	△
6	雨水施設		内陸部	◎	△	△	○	△
			沿岸部	◎	◎	△	○	△

◎重度の要求性能 ○中度の要求性能 △軽度の要求性能

1.5 本論文の概要・構成

本論文は全6章から構成している。各章の概要は以下に示すとおりであり、IBPMに関する研究開発の変遷を辿る形で、結合材、コンクリート、プレキャスト製品への適用について記述している。そのフローチャートを図1-1に示す。

本研究は、CO₂などの温室効果ガスの排出によって、地球の温暖化現象やこれに伴う気候変動などが発生している背景を踏まえて、脱炭素化によって地球環境を保全すると共に、ゼロエミッションに向けて産業副産物の有効利用が可能な、セメントを使用しない硬化体「Industrial By-Product Materials」(以降IBPMと称する)に関するものである。また、IBPM硬化体は高緻密であることから、耐硫酸性や耐塩害性などに優れ、100年超級の高耐久性が期待できると共に、従来の普通コンクリートに比べてCO₂排出量を約80%削減できる特長を有している。セメントの代替として用いるIBPM結合材には、フライアッシュと高炉スラグ微粉末を中心にシリカフェームを含めた3種類の産業副産物と、アルカリ刺激剤として水酸化カルシウム(消石灰)、硬化後の収縮低減を期待した膨張材を加えた計5種類を用いている。

本研究は、IBPMコンクリートをプレキャスト製品に適用することを目的に行ったものである。

第1章の「序論」では、本研究の背景や既往の研究および本研究の目的について述べると共に、プレキャスト製品としてIBPMコンクリートに要求される性能を示した。

第2章「IBPMコンクリートの圧縮強度に及ぼす材料と種類および配合の影響」では、IBPM結合材に使用した各種材料と混合比率およびアルカリ刺激材の選定に関するモルタル実験について記述した。この中では、3種類のアルカリ刺激材について圧縮強度の発現性について検証し、二水石膏(GY)、水酸化カルシウム(CH)、石灰石微粉末(LPS)の中からCHを選定した。また、IBPMによるモルタル供試体の基本的な性状として、凝結時間、圧縮強度、硫酸浸漬試験結果について述べると共に、IBPM結合材の主材料のひとつであるフライアッシュについて着目し、その品質の影響についても言及した。その後、コンクリートに移行し、遠心成形供試体と振動成形供試体で耐硫酸性や長期強度特性を確認し、IBPMの大きな特長として耐硫酸性に優れることが明らかとなった。次に、ヒューム管(開削管)配合に準じたIBPMコンクリート配合で蒸気養生を行った後の強度発現性を確認したところ、材齢14日で40N/mm²相当の圧縮強度が得られた。更に、IBPMコンクリートを様々なプレキャスト製品に適用するために、50N/mm²以上の高強度化が得られるように単位水量や水結合材比などの配合条件について大幅な見直しを行った。具体的には、単位水量(W)120kg/m³以下、水結合材比(W/B)30%以下、高性能減水剤(SP)添加率1.2%以上のコンクリートについて研究した結果、IBPMコンクリートにおいても80N/mm²程度までの高強度が得られた。

第3章「IBPMコンクリートの耐久性」では、IBPMコンクリートの耐久性を確認するために、収縮性状、耐硫酸性、耐塩害性、中性化抵抗性、耐凍結融解抵抗性、すり減り抵抗性、アルカリ骨材反応抑制効果に関する研究を行い、総じて良好な結果が得られた。また、アルカリ骨材反応においては、仮に「無害でない骨材」を使用した場合でもIBPMコンクリートが抑制効果を有していることが分かった。なお、電子顕微鏡観察や細孔径分布についても計測し、IBPMコンクリートが緻密な硬化体であることを確認した。

第4章「RC構造体の曲げ耐力と変形性能」では、プレキャスト製品工場においてIBPMコンクリート製のRC梁を製造し、静的曲げ載荷試験を行って、普通コンクリート梁との違いについて検証した。その結果、両者は同等の曲げ耐荷性能と変形性能を有していることが明らかとなった。

第5章「プレキャストコンクリートへの適用検討」では、IBPM コンクリートを実際にプレキャスト製品（遠心成形製品、振動成形製品）に適用し、その品質を評価した。プレキャスト製品の種類は、ヒューム管（開削管、推進管）、マンホール、ボックスカルバート、セグメントの5種類であり、そのすべての製品において普通コンクリート製品の品質規格値を満足した。このうち、プレキャスト製品工場で製造したIBPM コンクリート製ヒューム管（開削管）の流水性能について、実製品による水理実験装置を設けて測定した結果、粗度係数は塩化ビニール管と同等なレベルにあることを確認した。また、IBPM コンクリート製プレキャスト製品の地球温暖化抑制効果を確認するためにCO₂排出量の削減率を算出したところ、普通コンクリートよりもCO₂排出量を約80%削減可能であることが分かった。

第6章「結論」では、各章のまとめと今後の課題や展望について記述すると共に、本研究によって確認されたIBPM コンクリートの特性や有効性について示した。IBPM コンクリートは、従来のセメントコンクリートにはない高耐久性を有し、脱炭素化に向けても非常に有効な新材料である。また、今後のコンクリート業界においては環境保全が必須となるため、セメントに替わる新材料としてIBPMへの期待が高まるものと考えられる。

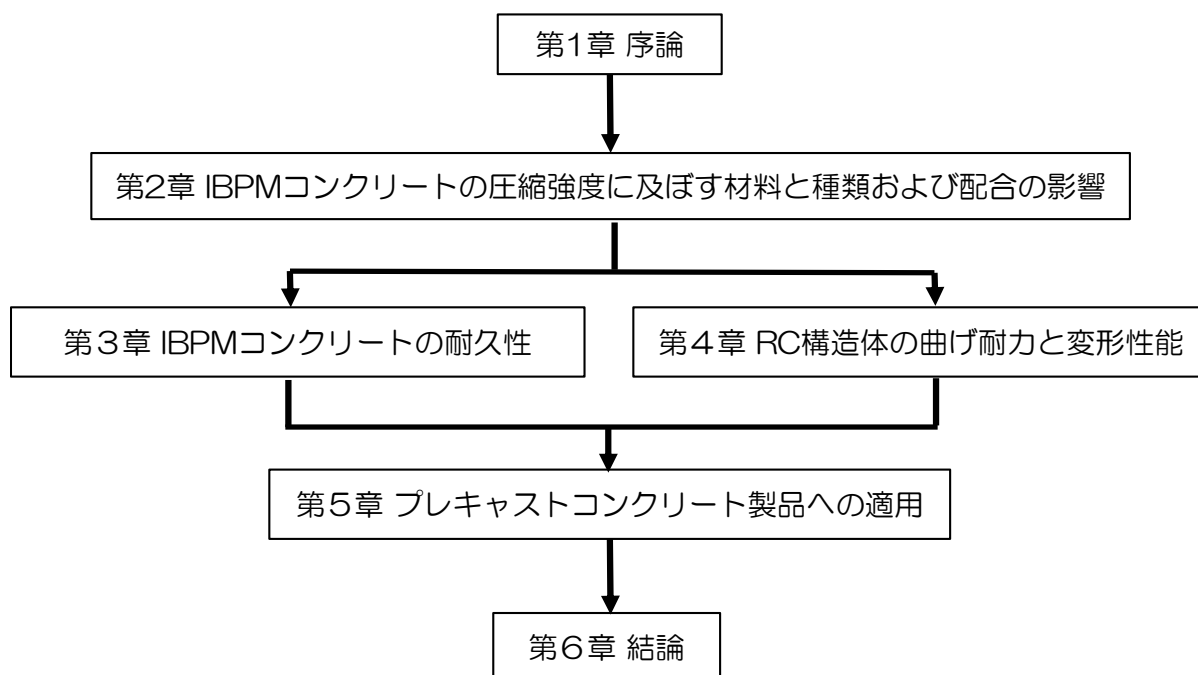


図 1—1 本研究のフローチャート

参考文献【第1章】

- 1-1) 下水道管路施設ストックマネジメントの手引き, 公益社団法人日本下水道協会, 2016年版, pp.2-2~2-11, 2016.12
- 1-2) 腐食の原因と対策(2), 生活排水中の硫酸イオンの由来に関する調査研究, 下水道協会誌論文集 No.1, Vol. 27, No.316, pp.130-136 (1990.8)
- 1-3) Pomeroy R.D. and Parkhurst J. D.: Self-purification in Sewers, Proceedings of the 6th International Conference on Water Pollution Control Research, Jerusalem, Pergamon Press. (1972.6)
- 1-4) 建設省都市局下水道部・日本下水道事業団:「下水管路施設の耐久性の向上と再生・更新に関する調査—平成4年度調査—」, 日本下水道事業団技術開発部報告書 92-014, 平成5年3月
- 1-5) A.G. Boon and A.R. Lister, Formation of Sulphide in Rising Main Sewers and Its Prevention by Injection of Oxygen, Prog. Water Tech, Pergamon Press, 1975.
- 1-6) P.H.Nielsen, T.H.Jacobsen: Effect of Sulfate and Organic Matter on the Hydrogen Sulfide Formation in Biofilms of Filled Sanitary Sewers: J WPCF, Vol.60, No.5, May 1988.
- 1-7) Robert L. Islander, Joseph S. Devinny, Florian Mansfeld, Adam Postyn, and Hong Shin: Microbial Ecology of Crown Corrosion in Sewers, Journal of Environmental Engineering, p.751, Vol.117, No.6 (1991)
- 1-8) Tanaka, N., Hvitved-Jacobsen, T. and Horie, T. (2000) Transformations of carbon and sulfur wastewater components under aerobic/anaerobic transient conditions in sewer systems. Wat. Env. Res. 72 (6) ,651-664.
- 1-9) 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
- 1-10) 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
- 1-11) 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
- 1-12) 一宮一夫, 津郷俊二, 原田耕司, 池田 攻: ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.575-585, 2011.
- 1-13) 菊地道生, 山本武志, 大塚 拓: 結合材種類および前養生が蒸気養生を施したジオポリマー硬化体の物理的性質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2283-2288, 2016.6
- 1-14) 堀口賢一, 松元淳一, 河村圭亮, 坂本 淳: 低炭素型コンクリートを使用したコンクリート二次製品の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.213-218, 2016.6
- 1-15) 宮原茂禎, 荻野正貴, 岡本礼子, 丸屋 剛: 高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を使用した環境配慮型コンクリートの水和反応と組織形成, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1969-1974, 2013.
- 1-16) 溝渕麻子, 小林利充, 神代泰道, 一瀬賢一: 混和材を高含有したコンクリートの CO₂ 削減効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.118-123, 2014.
- 1-17) 木村彩永佳, 関 健吾, 取違 剛, 横関康祐: 炭酸化養生を行った環境負荷低減型コンクリートの環境影響評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2254-2259, 2014.
- 1-18) 松家武樹, 鈴木康範, 堺 考司, 福留和人: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートに関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.295-302, 2010.
- 1-19) 堀口賢一, 松元淳一, 河村圭亮, 坂本 淳: 低炭素型コンクリートを使用したコンクリート二

次製品の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.38,No.1,pp213-218,2016.

- 1-20) 畑 実, 杉本克美, 林 悦朗, 岩佐行利, 井川秀樹, 宮澤伸吾:セメントを使わない硬化体によるプレキャスト鉄筋コンクリート部材の曲げ性状および下水道管への適用に関する研究, 土木学会論文集 E 2, Vol.77, No.4, pp.164-176, 2021.
- 1-21) 土木学会: 混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案): コンクリートライブラリー152, 2018.
- 1-22) Glasby, T.; Day, J.; Genrich, R.; Aldred, J. EFC geopolymers concrete aircraft pavements at Brisbane West Wellcamp Airport. Proceedings of the 27th Concrete Institute of Australia Conference, 2015.
- 1-23) 一宮一夫, 原田耕司, 津郷俊二, 池田 攻: 別府明礬温泉におけるジオポリマー製歩車道境界ブロックの表層劣化対策, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.73, V-282, 2018.
- 1-24) 佐藤隆恒, 大木信洋, 束原 実, 上原元樹: 石炭灰を原料とした短繊維補強ジオポリマー短まぐらぎの試作, コンクリート工学年次論文集,
- 1-25) 前田正博, 石井義明, 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
- 1-26) 畑 実, 杉本克美, 林 悦朗, 宮澤伸吾: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1834-1839, 2021.
- 1-27) 畑 実, 杉本克美, 林 悦朗, 宮澤伸吾: 高耐久性硬化体の諸性状と下水道管への適用に向けた基礎的研究, Cement Science and Concrete Technology, Vol.74, pp.420-427, 2021.

第2章 IBPM コンクリートの圧縮強度に及ぼす材料と種類

および配合の影響

2. 1 まえがき

第1章では、既往の研究や研究の目的、および要求性能について述べた。この中で、近年では産業副産物を混和材として多量に使用し、セメント使用量を抑制する取組がなされていること。これらの混和材には、高炉スラグ微粉末やフライアッシュが多く使われており、これをセメントと置換する事例が主流であること。新たな傾向としては、産業副産物の使用量を飛躍的に増大させて、セメントを全く使用していない結合材をPCa製品に適用する研究が行われるようになったことを述べた。

第2章では、「IBPM コンクリートの圧縮強度に及ぼす材料と種類および配合の影響」として、本研究における各種使用材料やアルカリ刺激材の選定、配合条件、成型方法、蒸気養生による強度発現性、耐硫酸性について、モルタル実験からコンクリート実験に至る内容を述べると共に、硬化体の硬化メカニズム（水和物の同定）について記述する。これを踏まえて、目標としてきた圧縮強度（40N/mm²）を50N/mm²以上の高い強度レベルまで拡大するための研究を行った。具体的には、使用材料ではBFSの混合比率の増大による圧縮強度の向上を考慮し、IBPM 結合材におけるFAとBFSの構成比率を5:5から4:6に変更した。また、凝結時間の短縮も考慮して、強度増進効果を有する早強性EXの混入率を11%まで増量した。

IBPM コンクリートの配合では、単位水量（W）を大幅に減じて、水結合材比（W/B）を著しく低く設定した。これは、W/Bの低減に伴って単位結合材量（B）が大きくなるため、硬化時の発熱や収縮の増大、および材料コストの増加が懸念された為である。このことから、Bを極力増加せずにWを可能な限り減少させて、W/Bを下げる検討を行った。すなわち、W/Bは30%以下、Wは105~130kg/m³程度まで減じた配合を対象とし、コンクリートの流動性を確保するために高性能減水剤（Sp）を効果的に増量した。

2. 2 モルタルの実験方法

2. 2. 1 使用材料および配合

IBPM 結合材の使用材料は、FA（フライアッシュ）とBFS（高炉スラグ微粉末）を主材料とし、SA（下水汚泥焼却灰の粒度調整灰）、SF（シリカフューム）の計4種類の産業副産物を用いている。これにEX（膨張材）と後述するアルカリ刺激材を添加し、表2-1に示す合計6種類の材料でIBPM 結合材を構成している。骨材には表2-2に示したJIS A 5005に適合する砕砂と砕石2005を使用し、Sp（混和剤）にはJIS A 6204に相当するポリカルボン酸系の高性能減水剤を用いた。

このうちSAは図2-1に示すように、下水道汚泥焼却灰（原料灰）を63μmの通過分が90%以上になるように粒度調整したものである。その化学成分を表2-3に示す。SAは下水道施設内で発生した汚泥を起源としているため、資源リサイクルの観点からヒューム管の材料として積極的に活用することとした。なお、SFは緻密化と強度向上、EX（膨張材）はIBPM コンクリートが硬化した後の収縮低減を期待して使用した。

IBPM 結合材に用いている6種類の材料の化学成分は表2-3に示したとおりであり、FAとBFSでIBPMの約80%を占め、残りの約20%をアルカリ刺激材、SF、EX、SAで構成している。また、アルカリ刺激材、SF、EX、SAで構成している。IBPM 結合材の使用材料とアルカリ刺激材の選定に用いた3種類の材料を表2-3に示す。また、アルカリ刺激材の候補として用いた3種類の材料、GY（二水石膏：CaSO₄・2H₂O）、CH（水酸化カルシウム（消石灰）：Ca(OH)₂）、LPS（石灰石微粉末：CaCO₃）を使用し

た。

IBPM 結合材の化学成分の中心は SiO_2 , CaO , Al_2O_3 である。SF には SiO_2 , EX には CaO が多いことが顕著であり, SA には SiO_2 と P_2O_5 が比較的多く含有されている。

IBPM 結合材の特徴は, 前述したように 4 種類の産業副産物を用いていること, その中に SA (下水汚泥焼却灰の粒度調整灰) を含んでいること, セメントレスであることと言える。SA は FA と比較して比表面積が大きく, 活性度指数が同等レベルにあることで, マイクロファイラー効果によるコンクリート強度の向上が報告¹⁾されている。

これらの産業副産物を硬化させて, 適切な凝結時間, 硬化時間, 強度発現性を確保するためにはアルカリ刺激材が必要である。そこで, 本研究ではアルカリ刺激材の候補とした GY, CH, LSP の使用量をモルタル配合で $30\text{kg}/\text{m}^3$ に統一し, アルカリ刺激材としての潜在的な性能として, モルタル強度の発現性に主眼を置いて評価した。なお, CH ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ 消石灰) には JIS R 9001 特号を使用している。

本研究では, FA, BFS, SA, SF, EX およびアルカリ刺激材で構成される IBPM をモルタルの結合材として用いた。モルタルの配合は, OPC 製ヒューム管で一般的に用いられているコンクリート配合 ($\text{C}=440\text{kg}/\text{m}^3$, $\text{W/C}=34\sim 36\%$, $\text{s/a}=41\%$) を基準にして設定した。ただし, IBPM の粉体密度が低いことから粉体体積が多くなり, モルタルの粉体密度が低いことから粉体体積が多くなり, モルタルの粘性が高くなるため, ワークビリティ確保の観点から単位結合材量および単位水量を増やす必要がある。そこで, モルタルの単位結合材量を, SA やアルカリ刺激材の有無により異なるが, コンクリート換算で $460\sim 560\text{kg}/\text{m}^3$ とした。このコンクリートのモルタル部分の配合を IBPM モルタルの配合とした。W/B を 36% (又は 34%) に設定した。さらに, モルタル中の単位細骨材量や Sp 添加量は, コンクリート配合のモルタル部分の配合から換算して求めた。

アルカリ刺激材の種類の影響を検討するために実験に使用したモルタルの配合 (W/B の結合材 B は, IBPM の総量) は表 2-4 に示すとおりである。アルカリ刺激材は, 配合 A には GY, 配合 B には CH, 配合 C には LSP を混入量 $30\text{kg}/\text{m}^3$ として用い, 配合 D は無混入である。

SA の混入量を決定するために $0\text{kg}/\text{m}^3$ (IBPM 量の 0%), $41\text{kg}/\text{m}^3$ (5%), $86\text{kg}/\text{m}^3$ (10%) に相当する量の SA で構成したモルタル配合を表 2-5 に示す。アルカリ刺激材には CH を $32\text{kg}/\text{m}^3$ で用いた。

アルカリ刺激材として選定した CH の混入量の影響を検討するため, 表 2-6 に示すとおり, CH 量を $0\text{kg}/\text{m}^3$ (IBPM 量の 0%), $32\text{kg}/\text{m}^3$ (4%), $68\text{kg}/\text{m}^3$ (8%), $106\text{kg}/\text{m}^3$ (12%) に変化させた。

表 2-1 IBPM 結合材の使用材料とアルカリ刺激材の候補

使用材料 (記号)	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	活性度指数 σ28日(%)
FA	2.20	3480	81
BFS	2.91	4230	92
SA	2.60	8360	80
SF	2.30	191000	110
EX	3.15	4560	—
GY	2.32	4500	88
CH	2.32	150000	—
LSP	2.76	2930	—

表 2-2 IBPM コンクリートの使用骨材

種別	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率 (%)	岩種
砕砂	2.62	1.76	2.64	硬質砂岩
砕石2005	2.67	1.51	6.69	硬質砂岩

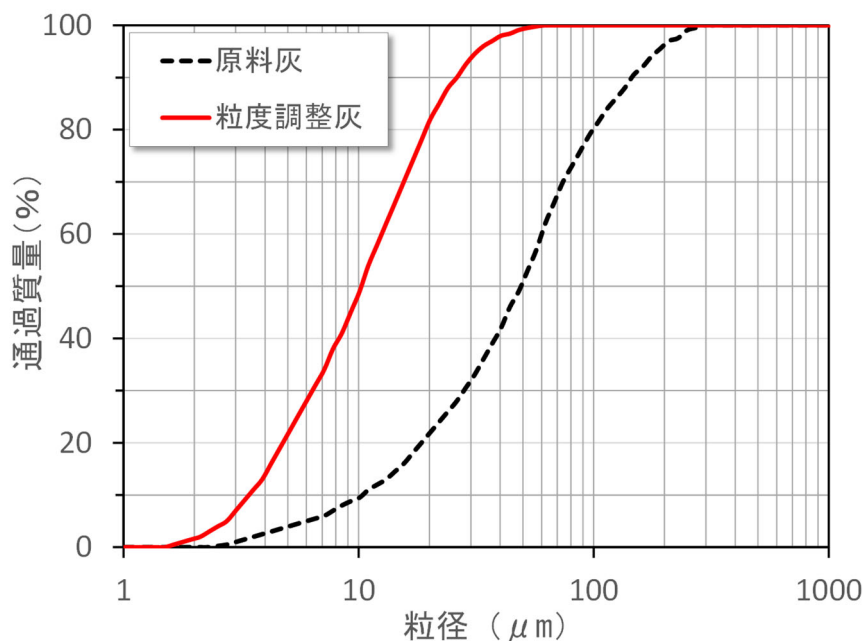


図 2-1 SA の粒度分布

表 2-3 IBPM 結合材とアルカリ刺激材の化学成分

Material	Ig.loss (%)	Chemical composition (%)									
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
FA	2.63	52.78	29.05	4.12	3.79	1.90	0.26	0.50	1.09	1.59	0.41
BFS	0.08	34.03	14.69	0.41	42.90	6.01	—	0.22	0.32	0.55	0.01
SA	2.90	24.57	16.65	6.41	12.24	4.25	1.61	1.08	2.82	0.93	24.77
SF	3.71	92.97	—	—	—	0.37	0.65	—	—	—	—
EX	4.40	4.43	1.36	0.67	60.36	0.64	27.28	0.12	0.11	0.07	0.11
GY	21.96	0.13	0.05	0.06	34.29	0.06	43.31	—	—	0.01	0.02
CH	24.76	0.19	0.11	0.12	73.82	0.77	0.07	ND	0.01	0.02	0.03
LSP	43.34	—	0.05	0.02	55.86	0.21	—	—	—	—	0.02

2. 2. 2 供試体の制作方法と養生方法

IBPM モルタルを容量が 2L のモルタルミキサで練り混ぜ、ブリキ製の型枠に打設して、モルタル製の円柱供試体（直径 50×高さ 100mm）を作製後、前置時間 4h、昇温 20°C/h、最高温度 65°C、最高温度保持時間 4h、自然降温の条件で蒸気養生を行った。この蒸気養生条件は、プレキャストコンクリート製品工場で通常行われている蒸気養生条件である。その後、気温 20°C、相対湿度 60%の標準恒温恒湿室内に静置して、所定の材齢まで気中養生を行った。

所定の養生を行った後、材齢7日、14日、28日で圧縮強度試験を行った。なお、一部の配合では、試験材齢として材齢1日（蒸気養生終了直後）を加えた。これは、プレキャスト製品では蒸気養生後、翌日（材齢1日）の脱型が求められるため、翌日の脱型の可否を判定するためである。脱型時に必要と考えられる圧縮強度は、対象とする製品の形状や大きさ、搬出方法などによって異なるが10N/mm²程度以上である。

表2-4 アルカリ刺激材を選定するためのモルタル配合

配合 No	B (kg/m ³)	W/B (%)	単位量(kg/m ³)										モルタルフロー (mm)	
			W	FA	BFS	SF	EX	SA	アルカリ刺激材			S		Sp
									GY	CH	LSP			
A1	759	36	275	239	398	46	46	0	30	0	0	1072	7.6	215
A2	759	36	275	318	318	46	46	0	30	0	0	1050	7.6	221
A3	759	36	275	398	239	46	46	0	30	0	0	1033	7.6	223
B1	759	36	275	239	398	46	46	0	0	30	0	1072	7.6	223
B2	759	36	275	318	318	46	46	0	0	30	0	1050	7.6	221
B3	759	36	275	398	239	46	46	0	0	30	0	1028	7.6	234
C1	759	36	275	239	398	46	46	0	0	0	30	1078	7.6	223
C2	759	36	275	318	318	46	46	0	0	0	30	1056	7.6	221
C3	759	36	275	398	239	46	46	0	0	0	30	1036	7.6	220
D1	729	36	262	239	398	46	46	0	0	0	0	1145	7.3	224
D2	729	36	262	318	318	46	46	0	0	0	0	1124	7.3	225
D3	729	36	262	398	239	46	46	0	0	0	0	1100	7.3	226

表2-5 SA混入量を選定するためのモルタル配合

配合 No	B (kg/m ³)	W/B (%)	SA (%)	単位量(kg/m ³)									モルタルフロー (mm)
				W	FA	BFS	SF	EX	SA	CH	S	Sp	
1	774	34	0	263	325	325	46	46	0	32	1068	7.7	210
2	815	34	5	276	325	325	46	46	41	32	994	8.1	198
3	860	34	10	292	325	325	46	46	86	32	908	9.0	191

表2-6 CH混入量の効果を確認するためのモルタル配合

配合 No	B (kg/m ³)	W/B (%)	CH (%)	単位量(kg/m ³)									モルタルフロー (mm)
				W	FA	BFS	SF	EX	SA	CH	S	Sp	
1	782	34	0	266	325	325	46	46	40	0	1057	7.8	197
2	814	34	4	276	325	325	46	46	40	32	996	8.1	196
3	850	34	8	288	325	325	46	46	40	68	926	8.4	192
4	888	34	12	302	325	325	46	46	40	106	840	8.8	193



写真2-1 モルタルフロー

2. 2. 3 圧縮強度試験

表 2-4, 表 2-5, 表 2-6 に, モルタルの配合およびフロー値の測定結果を示す。アルカリ刺激材の効果の検討は, SA 混入率 0% の配合を対象に行ったものであり, 3 種類のアルカリ刺激材がモルタル強度に及ぼす影響を評価した。

図 2-2 は, 材齢 7 日, 14 日, 28 日におけるモルタルの圧縮強度試験結果を示したものである。このうち, 最も有効なアルカリ刺激材は CH (B1 配合) であり, 材齢 28 日の圧縮強度は約 39N/mm^2 が得られた。次いで GY (A1 配合) が約 33N/mm^2 であり CH との強度差が約 6N/mm^2 認められた。また, LSP (C1 配合) は CH や GY に比べると圧縮強度が低く, 材齢 28 日で約 14N/mm^2 であり, アルカリ刺激材を混入していない D1 配合と同等のレベルに留まった。これらの結果から, アルカリ刺激材として CH を用いた場合に BFS の潜在水硬性や FA のポズラン反応が進行しやすいことが推察される。

FA と BFS の混合比率では, 何れのアルカリ刺激材においても BFS の混入率が多い配合 (A1, B1, C1, D1) の方が材齢 28 日までの圧縮強度は高かった。IBPM の水和反応においても, アルカリ刺激材による BFS の水和反応と, FA のポズラン反応が生じていると考えられ, 前者の反応の方が速いことが推察される。

アルカリ刺激材として最も効果的であった CH の場合, B2 配合 (FA : 50.0%/BFS : 50.0%) は B1 配合 (FA : 37.5%/BFS : 62.5%) に比べると圧縮強度は低いが, その差は材齢 28 日で僅かに 3N/mm^2 であり, 両者とも 35N/mm^2 程度以上であった。他方では, 既往の研究結果において, FA の割合が高く, BFS の割合が低いほど, 耐硫酸性が向上するとの報告がある^{2)~5)}。そこで, 強度発現性と耐硫酸性の観点から以降の実験では, アルカリ刺激材には CH を使用し, FA と BFS の混合比率は FA50.0%, BFS50.0%とした。

図 2-3 は, モルタルの圧縮強度に及ぼす SA 混入量の影響を示したものである。SA の混入量が 86kg/m^3 (10%) 以下であれば SA 無混入 (0kg/m^3) と圧縮強度はほぼ同等であり, 材齢 28 日で約 35N/mm^2 であった。

SA の混入量が 0kg/m^3 (0%) と 41kg/m^3 (5%) ではモルタルのフレッシュ性状に変化はないものの, 86kg/m^3 (10%) になると IBPM モルタルに強張りが生じ, 流動性が悪くなる。これは, SA の比表面積が大きいため流動性が低下したものと考えられる。このため, SA を混入していない配合 (0%) のモルタルフロー値 210mm に対して $\pm 20\text{mm}$ の範囲を目標として, 表 2-5 に示すように高性能減水剤を増量した。

以上の結果から, SA を混入しても圧縮強度を低下させず, 高性能減水剤量をあまり増加させずにワーカビリティが確保できる SA の添加量として, 以降の実験では 40kg/m^3 (IBPM 量の 5%相当) とした。

図 2-4 は, モルタルの圧縮強度に及ぼす CH 混入量の影響を示したものである。CH 量以外の IBPM 材料の使用量は一定である。その結果, CH を 32kg/m^3 (IBPM 量の 4%相当) よりも増量しても IBPM モルタルの強度増進は得られないことが分かった。材齢 28 日までの強度発現は, 主に CH のアルカリ刺激による BFS の潜在水硬性によって得られたものと考えられ, BFS の反応に対しては CH 混入量 4% で十分であったことが推察される。なお, 材齢 28 日以降については, CH と FA のポズラン反応による強度発現が期待できるため, 長期強度の発現に対する適切な CH 混入量を今後, 確認することが必要である。

以上のモルタル実験の結果から、IBPM の材料構成として、BFS と FA の混合比率を 50 : 50 とし、SA の混入率を 5%、アルカリ刺激材には CH を 4% とした。このモルタル配合により、材齢 28 日の圧縮強度が 35N/mm² 程度となることが明らかとなった。

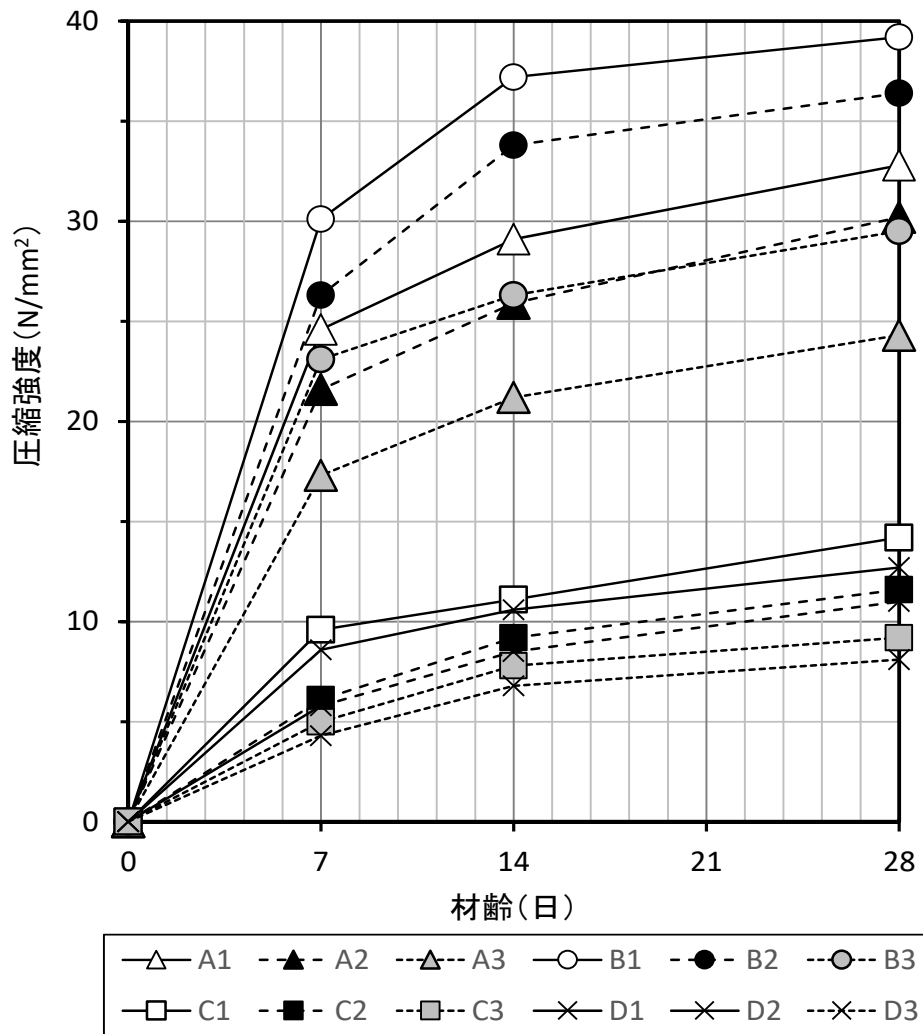


図 2-2 アルカリ刺激材の効果

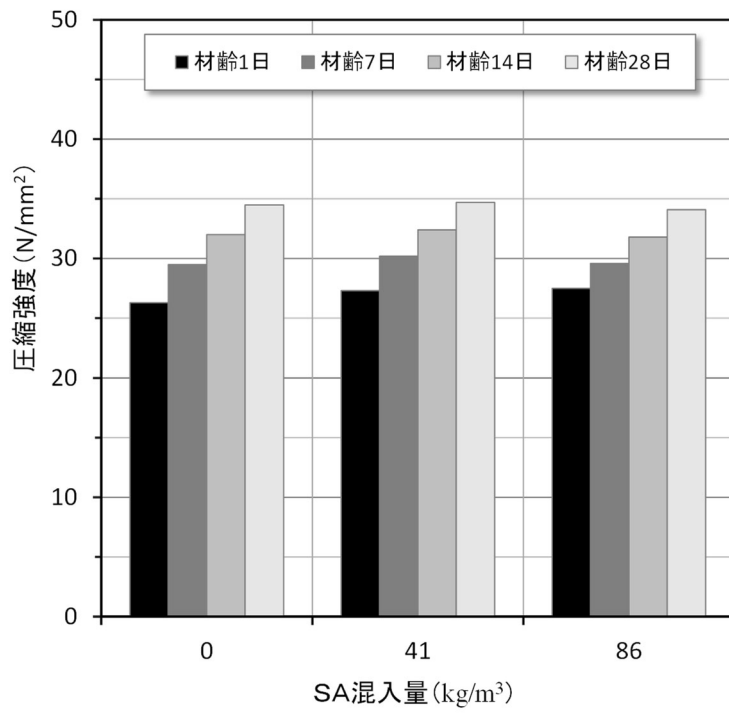


図 2-3 SA 混入量と圧縮強度

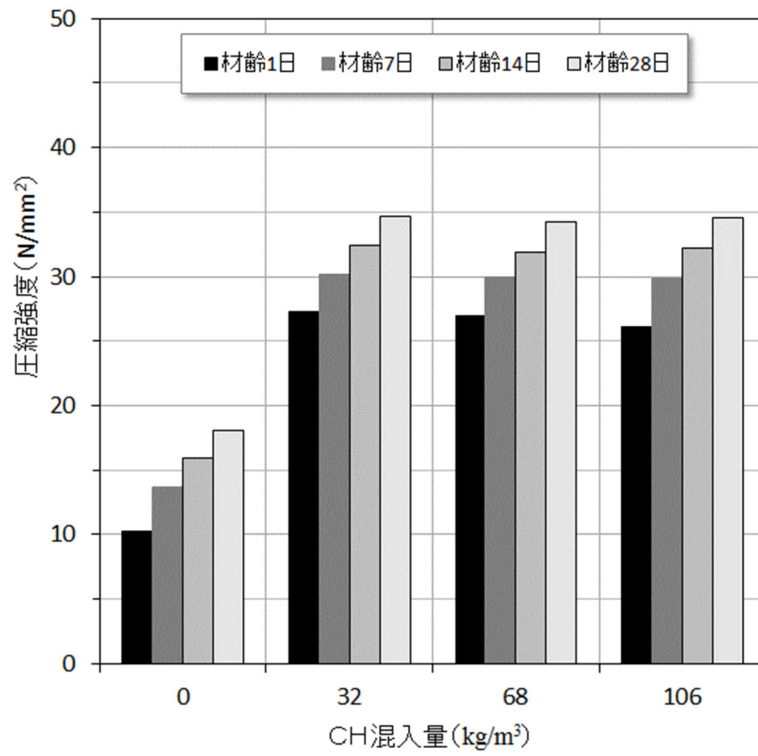


図 2-4 CH の混入量と圧縮強度

2. 2. 4 円柱供試体の硫酸浸漬試験

耐硫酸性試験では、表 2-7 に示した IBPM の配合から、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⁶⁾。このモルタルは表 2-7 に示したコンクリート配合から、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 1.96l 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。

5%濃度の硫酸水溶液に 28 日間浸漬後の試験結果を、図 2-5 と写真 2-2 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。

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 2-6 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（CaSO₄・2H₂O）が主原因であることが、推定された⁷⁾。

表 2-7 IBPM 供試体の配合

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 (kg/m ³)									
					W	FA	BFS	SA	SF	Ca(OH) ₂	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

表 2-8 OPC 供試体の配合

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 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	OPC	S	G	Ad
20	6.0 ± 2.0	2.0 ± 1.0	31.3	41.0	147	470	746	1055	1.84

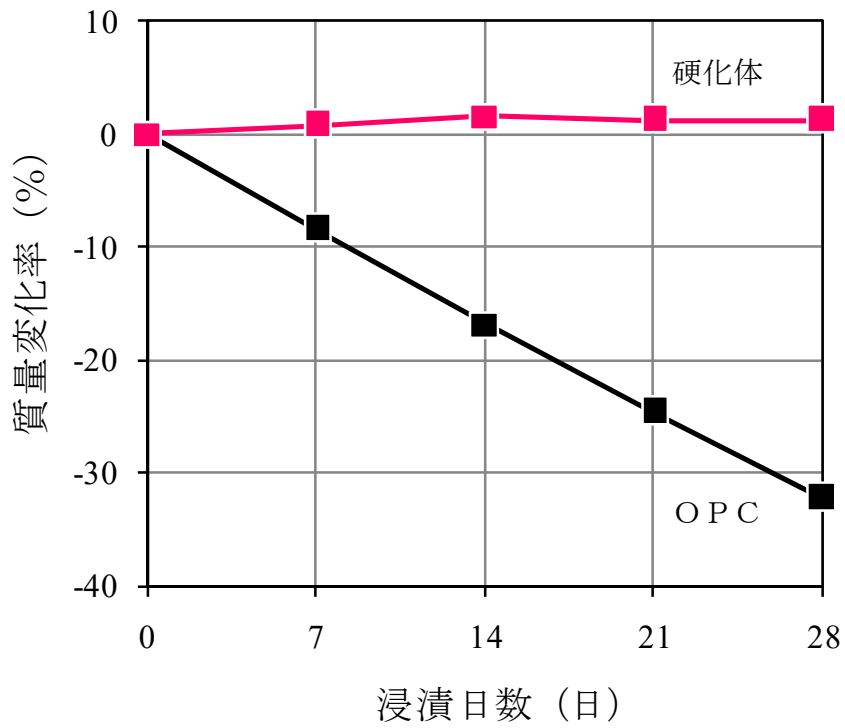


図 2-5 IBPM モルタル供試体の耐硫酸性

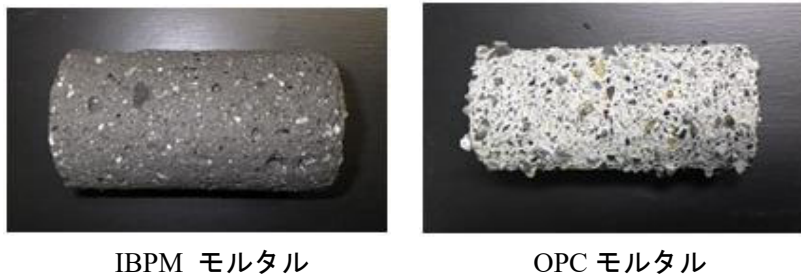


写真 2-2 硫酸浸漬後におけるモルタル供試体の外観

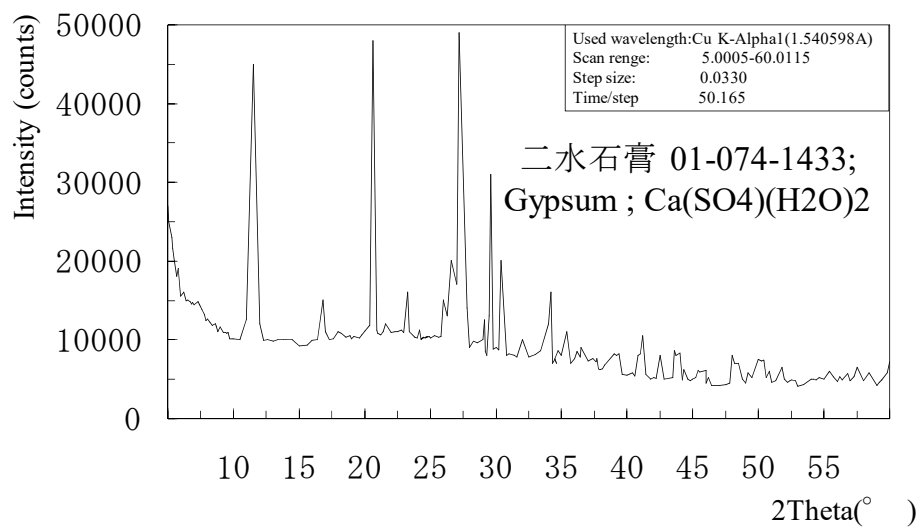


圖 2-6 粉末 X 線回析測定結果

2. 2. 5 凝結時間

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 2-7 に示した IBPM の配合から、粗骨材を除いたものである。下水汚泥焼却灰を混入したモルタルの凝結試験ではセメントの硬化時間に対して約 1 時間遅延したとの報告⁸⁾があるが、図 2-7 に示すように IBPM の始発は 14 時間、終結は 19 時間であり、普通コンクリート（OPC）の標準的な凝結時間（始発 4 時間、終結 6 時間）に比べて大きく遅延することを確認した。その理由としては、結合材の主材料としてフライアッシュと高炉スラグ微粉末を使用しているため、ポゾラン反応と潜在水硬性による硬化の速度が遅いことや、粒度調整灰が含有するリンによる硬化遅延が影響していることが考えられる。

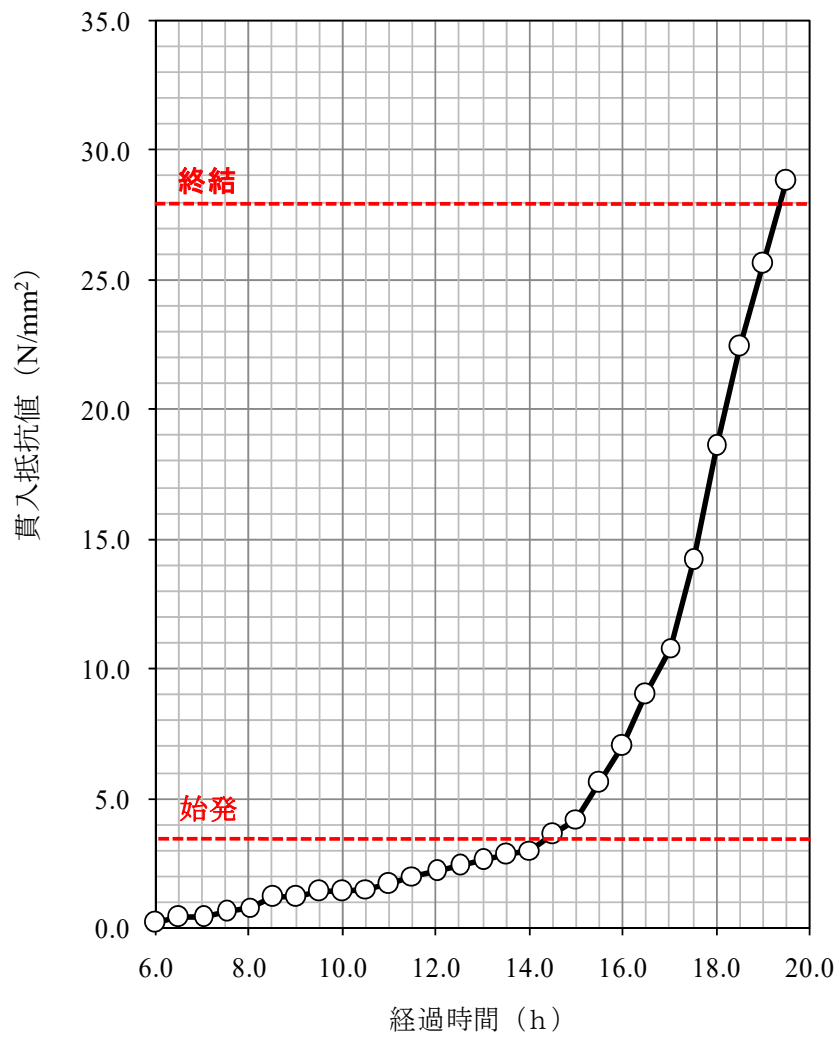


図 2-7 凝結試験結果

2. 2. 6 硬化メカニズム（水和物の同定）

IBPM 結合材の硬化メカニズムを解明する目的で、硬化後の水和生成物を XRD（粉末 X 線回析法）によって確認した。XRD では IBPM のペースト W/B30%（B は IBPM の総量）を用いて行った。図 2-8 に、蒸気養生直後、材齢 14 日、28 日、91 日の各水準における XRD の測定結果を重ね合わせて示した。その結果、C-S-H と Ett（エトリンガイト）のピークが検出された。IBPM の硬化過程や強度発現に、C-S-H の生成や膨張材に由来すると考えられる Ett が貢献していることが窺われるが、生成物の細孔構造等も含めて今後の検討課題である。

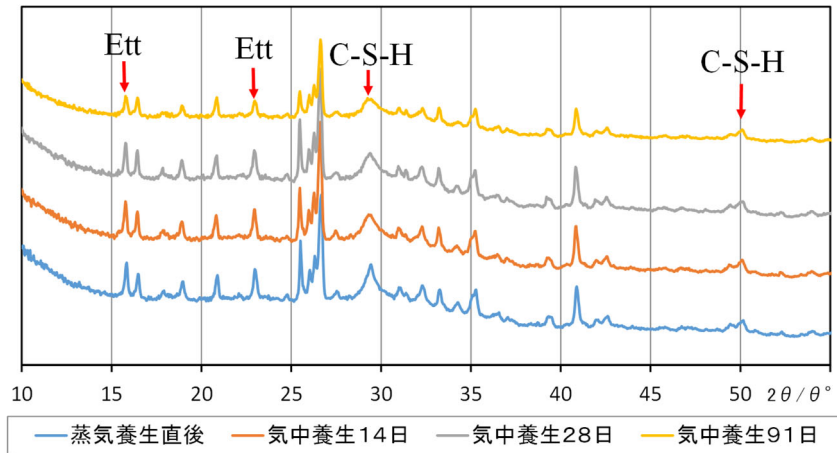


図 2-8 粉末 X 線回析分析結果

IBPM の硬化に及ぼす水和生成物を同定するために、表 2-9 に示す配合から水（W）と結合材（B）を練り混ぜたペーストの供試体を作製して蒸気養生を行い、標準恒温恒湿室内（気温 20°C 湿度 60%）において気中養生を行った。当該配合は、材齢 28 日の圧縮強度が概ね同等レベルになるように各種配合の水結合材比（W/B）を調整したものである。

IBPM と比較するために、普通ポルトランドセメント（OPC）、高炉セメント B 種（BB）、フライアッシュセメント C 種（FC）も同様にペーストの供試体を作製し、粉末 X 線回折を行った。この時、BB は OPC50% に対して高炉スラグ微粉末を 50%、FC は OPC75% に対してフライアッシュを 25% の比率で混合した。粉末 X 線回折は蒸気養生直後、材齢 14 日、28 日、91 日に実施し、その都度検出される物質を同定した。その結果いずれの材齢においても同一の物質が同定された。

表 2-10 に粉末 X 線回折によって同定された物質を示すように、IBPM からは、CSH（カルシウムシリケート水和物）、Ett（エトリンガイト）、Q（石英）、Mu（ムライト）の 4 種類が同定された。その一方で、使用材料である $\text{Ca}(\text{OH})_2$ （ポルトランドダム：水酸化カルシウム）は検出されなかったことから、水和初期から各種材料の反応によって消費され、BFS、FA、SA、SF などの水和物が IBPM の硬化に寄与したものと考えられる。また、Ett は IBPM に混入した膨張材に由来し、Q と Mu はフライアッシュに由来するものと考えられる。これらのことから、IBPM の硬化は CSH によるものであると推察される。なお、BFS や FA の反応率については今後の検討課題である。

表 2-9 各種コンクリートの配合

種別	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	B	S	G	Sp
IBPM	30	150	500	686	1006	4.00
OPC	50	175	350	746	1094	2.80
BB	46	175	380	730	1071	3.04
FC	46	175	380	726	1065	3.04

表 2-10 同定された水和生成物

Type	Identified substances								
	C ₂ S	C ₄ AF	CH	CC	E t t	Ms	CSH	Q	Mu
IBPM	—	—	—	—	○	—	○	○	○
OPC	○	○	○	○	—	○	○	—	—
BB	○	—	○	○	—	○	○	—	—
FC	○	○	○	○	—	○	○	○	○

IBPM コンクリートは、高炉スラグ微粉末 (BFS) の潜在水構成、フライアッシュ (FA) やシリカフェーム (SF) のポズラン反応、これに、水酸化カルシウム (消石灰) によるアルカリ刺激材を加えることによって硬化する。

以下に IBPM コンクリートの硬化の概念図を示すように、IBPM コンクリートは普通コンクリートと同様、「ケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H)」を生成して硬化することが分かった。また、Ett は IBPM に混入している膨張材 (EX) に由来しているものである。なお、Q (石英) と Mu (ムライト) はフライアッシュの含有成分であり、フライアッシュの硬化が遅いため同成分が残っていたものと考えられる。

図 2-9 の潜在水硬性は比較的早いタイミングで硬化し、アルカリ刺激によって溶出した CaO と SiO₂ と H₂O が反応する。また、図 2-10 のポズラン反応は緩やかに遅いタイミングで硬化するため、水和熱が小さく、アルカリ刺激によって溶出した SiO₂ と Ca(OH)₂ の CaO と H₂O が反応する。

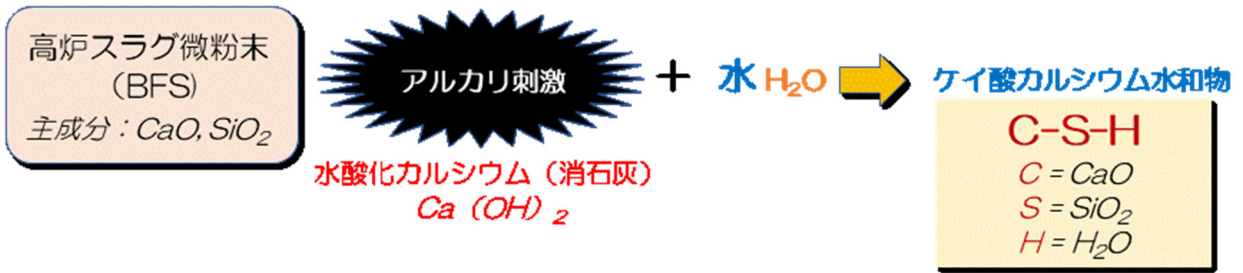


図 2-9 潜在水硬性による硬化メカニズム

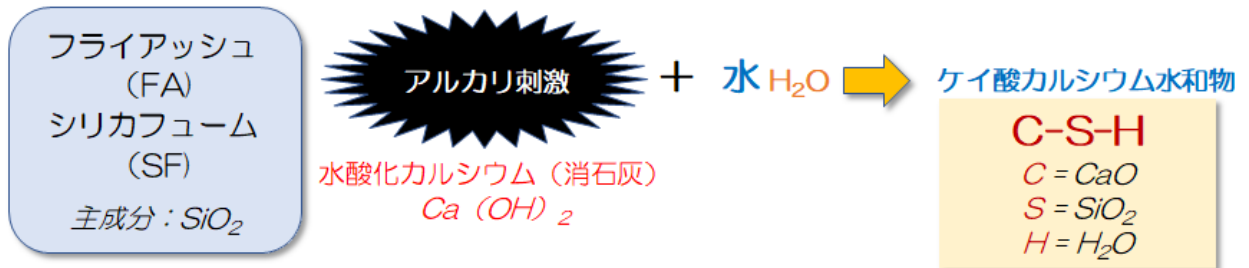


図 2-10 ポゾラン反応による硬化メカニズム

2. 2. 7 フライアッシュの影響

IBPM には FA が多く含まれているため、FA の品質の変動が IBPM コンクリートの品質に及ぼす影響について把握することは、実用上、重要な課題と考えられる。そこで、IBPM モルタルの圧縮強度に及ぼす FA の品質変動の影響について検討するために、国内の 14 箇所の火力発電所から入手した FA を使用した。

各 FA の密度、ブレン値、活性度指数などを表 2-11 に、化学成分を表 2-12 に示す。いずれの FA も、JIS の II 種の規定値³⁾を満足している。

表 2-11 全国 14 箇所の火力発電所から採取したフライアッシュの品質

発電所	密度 (g/cm ³)	ブレン (cm ² /g)	45 μm ふるい残分 (%)	フロー 値比 (%)	活性度指数		MB 吸着量 (mg/g)
					28d (%)	91d (%)	
A	2.34	4080	4.0	106	85	103	0.44
B	2.26	4270	6.1	107	88	104	0.24
C	2.36	4540	2.9	106	88	107	0.76
D	2.31	4470	2.3	105	84	103	0.33
E	2.29	3960	5.8	104	85	100	0.29
F	2.42	4530	0.1	107	91	106	0.46
G	2.30	4590	1.4	101	89	105	0.75
H	2.33	3600	9.8	103	82	98	0.31
I	2.23	3560	8.7	101	81	96	0.43
J	2.23	3380	8.6	104	83	96	0.44
K	2.25	3540	11.6	105	82	99	0.23
L	2.30	4070	4.2	105	83	100	0.23
M	2.31	4100	1.7	103	89	105	0.45
N	2.25	3700	11.9	102	87	103	0.32

表 2-12 全国 14 箇所の火力発電所から採取したフライアッシュの化学成分

発電所	湿分	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ Oeq	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cl
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(mg/kg)
A	0	1.8	59.8	24.27	4.19	1.94	1.09	0.21	0.62	1.50	1.61	1.23	0.41	0.03	10
B	0.1	1.2	60.2	22.85	3.65	4.62	1.15	0.44	1.35	0.95	1.98	1.02	0.21	0.05	30
C	0	1.9	52.9	29.50	3.37	2.74	1.58	0.20	0.46	1.44	1.41	1.72	0.41	0.03	30
D	0	1.7	63.0	22.69	3.97	2.09	0.82	0.19	0.52	1.39	1.43	1.11	0.69	0.05	20
E	0	1.6	60.0	23.37	4.24	3.78	1.29	0.38	0.94	1.05	1.63	1.05	0.48	0.05	20
F	0.2	1.9	53.0	25.44	6.00	3.96	1.51	0.50	0.57	1.62	1.64	1.28	0.87	0.07	20
G	0.2	3.2	60.5	23.40	3.85	2.48	0.98	0.36	0.57	1.37	1.47	1.12	0.40	0.03	30
H	0.1	2.0	56.6	23.78	5.58	3.86	1.30	0.65	0.60	1.40	1.52	1.21	0.43	0.05	30
I	0.1	2.3	65.3	21.16	3.93	1.90	0.90	0.29	0.67	1.10	1.39	1.02	0.27	0.05	10
J	0.1	2.4	62.7	23.72	3.05	1.31	0.68	0.30	0.35	1.27	1.19	1.35	0.37	0.02	10
K	0.1	1.6	61.2	21.67	5.13	3.25	0.99	0.35	0.79	1.59	1.84	1.06	0.18	0.06	20
L	0.2	2.2	61.3	22.14	4.52	3.18	1.48	0.49	0.69	1.19	1.47	1.12	0.30	0.04	10
M	0.1	2.1	58.3	22.85	3.74	5.90	1.42	0.54	0.69	1.08	1.40	1.12	0.42	0.06	40
N	0.1	1.7	58.6	24.20	4.13	3.95	1.24	0.39	0.71	1.03	1.39	1.30	0.25	0.05	30

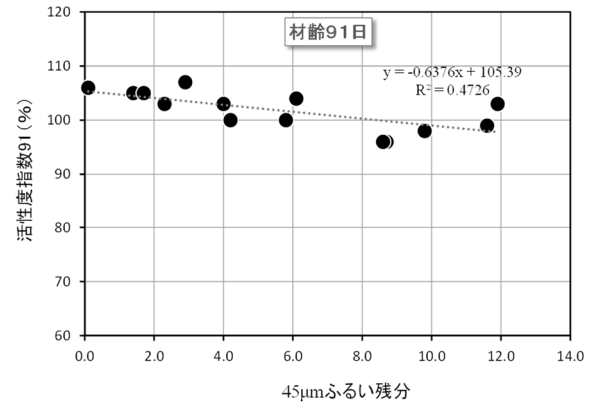
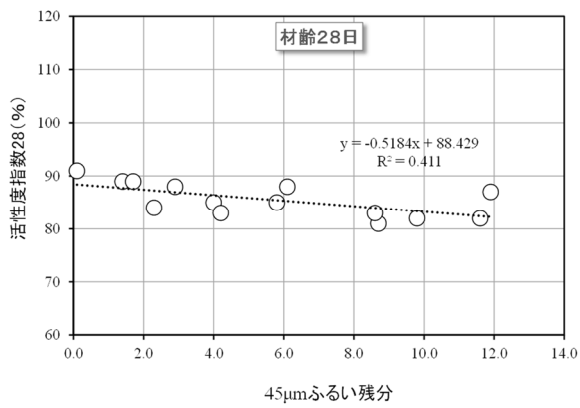


図 2-11 フライアッシュの45μmふるい残分と活性度指数

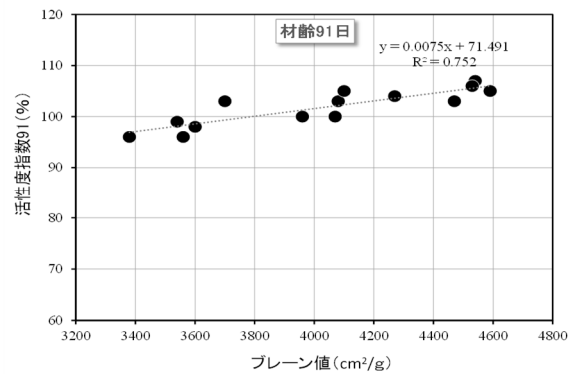
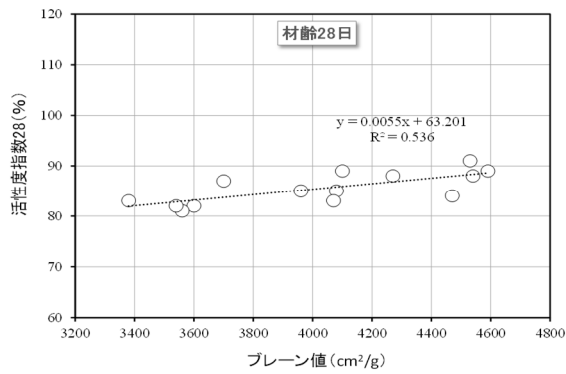


図 2-12 フライアッシュのブレン値と活性度指数

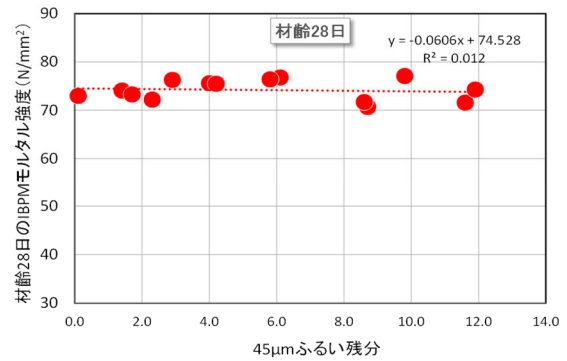
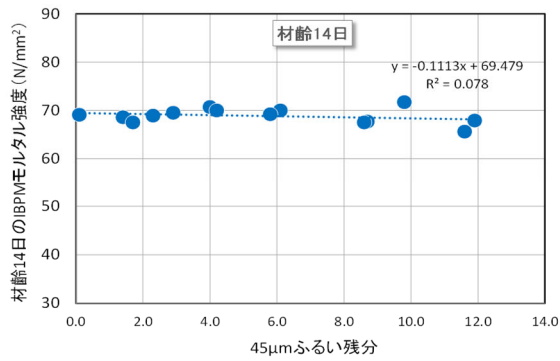


図 2-13 フライアッシュの45μmふるい残分とIBPMモルタル供試体の強度

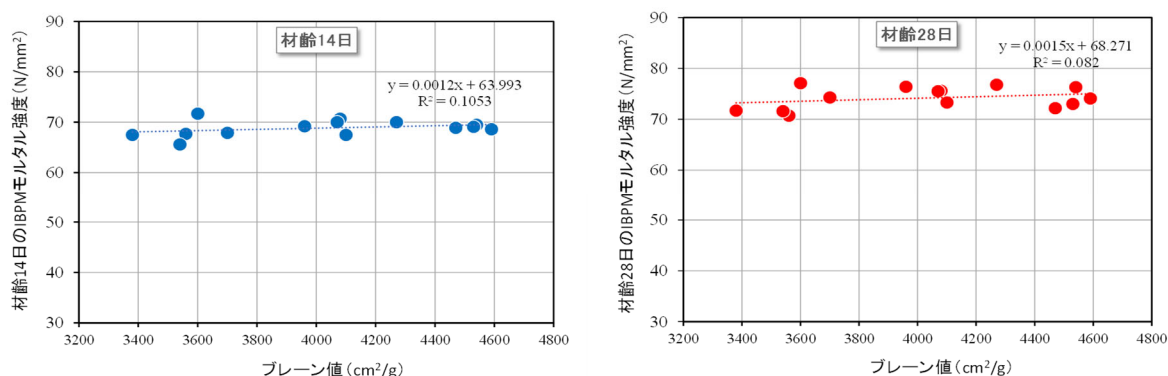


図 2-14 フライアッシュのブレーン値と IBPM モルタル供試体の圧縮強度

表 2-15 IBPM モルタル供試体の配合

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)				
	W	IBPM	EX	S	Sp
21	183	822	47	1217	15.6

図 2-11 および図 2-12 は、本研究で使用した 14 種類のフライアッシュのブレーン値および 45 μ m 残分と活性度指数の関係をそれぞれ示したものである。フライアッシュのブレーン値の増加に伴い、また 45 μ m 残分の減少に伴い、活性度指数は増加する傾向にあった。これらの結果は、モルタルによる圧縮強度の結果であるが、普通ポルトランドセメントを用いる場合は、使用するフライアッシュの品質によっては、最大で 10% 程度の差異が生じる可能性があることを示唆している。

図 2-13 および図 2-14 は、フライアッシュのブレーン値および 45 μ m 残分と IBPM モルタルの圧縮強度の関係をそれぞれ示したものである。試験に用いた IBPM モルタルの配合は後述する表 2-15 に示すとおりであり、表 2-26 に示した No.21 配合（ボックスカルバート）から粗骨材を除き、モルタル配合に修正したものである。また、IBPM モルタル供試体（ ϕ 50 \times 100mm）の製造後に蒸気養生を行い、所定の材齢まで気中養生を行っている。これらの試験結果から、IBPM モルタルの圧縮強度は、ブレーン値に伴う圧縮強度の変化は殆ど表れていない。また、フライアッシュの 45 μ m 残分が IBPM モルタルの圧縮強度に及ぼす影響も極めて小さかった。

以上のモルタル試験の結果から、FA の品質変動が IBPM コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響は、OPC に FA を混入する場合と比較して小さく、本研究に使用した FA の範囲内では、実用上無視できる程度であることが示唆された。

2. 3 コンクリートの実験方法

2. 3. 1 コンクリート配合

IBPM のフレッシュ性状は、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り返した結果、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 2-16 に示すとおりであり、水結合材比 (W/B) 34.0%，細骨材率 (s/a) 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、SA は結合材量の 5% に相当する量を細骨材と置換して用いた。

表 2-16 IBPM コンクリートの配合表

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 (kg/m^3)									
					W	FA	BFS	SA	SF	Ca(OH) ₂	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

表 2-17 OPC コンクリートの配合表

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 (%)	単位量 (kg/m^3)				
					W	OPC	S	G	Ad
20	6.0 ± 2.0	2.0 ± 1.0	31.3	41.0	147	470	746	1055	1.84

2. 3. 2 遠心成形と振動成形

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 2-18 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 2-3 に、遠心硬化体の外観性状を示す。

写真 2-4 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。

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 2-19 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。

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 2-20, 図 2-18, 図 2-19 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 2-20 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/mm² 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/mm² 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。

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。

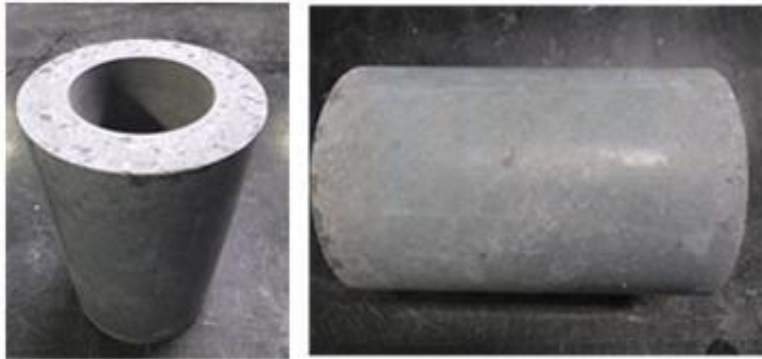


写真 2-3 遠心成形供試体の外観



写真 2-4 遠心成形の状況

表 2-18 遠心成形における加速度と成形時間

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

表 2-19 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				

表 2-20 IBPM 供試体の圧縮強度

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

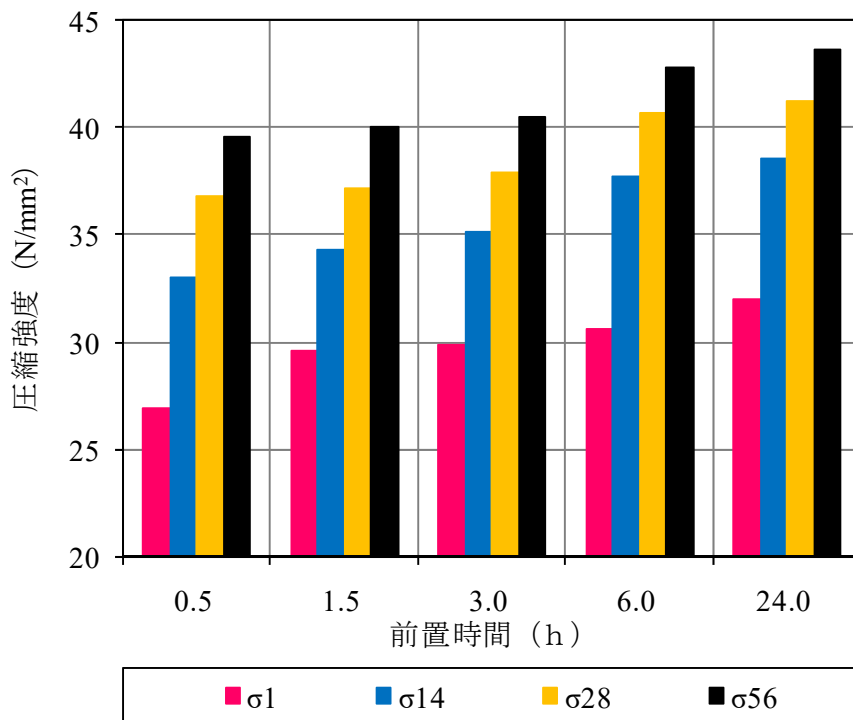


図 2-18 遠心成形による IBPM 供試体の圧縮強度

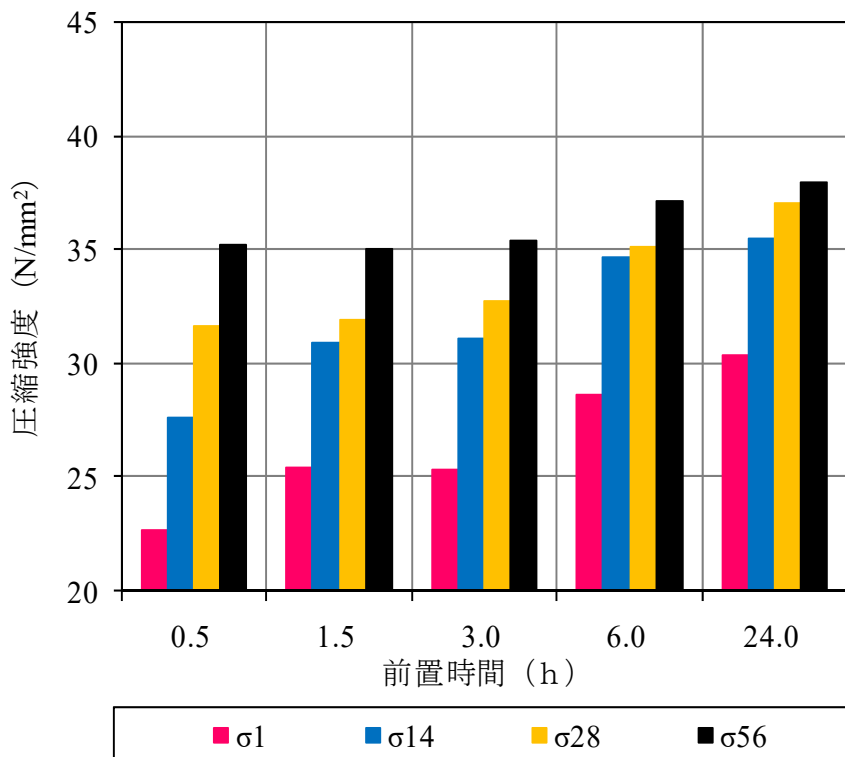


図 2-19 振動成形による IBPM 供試体の圧縮強度

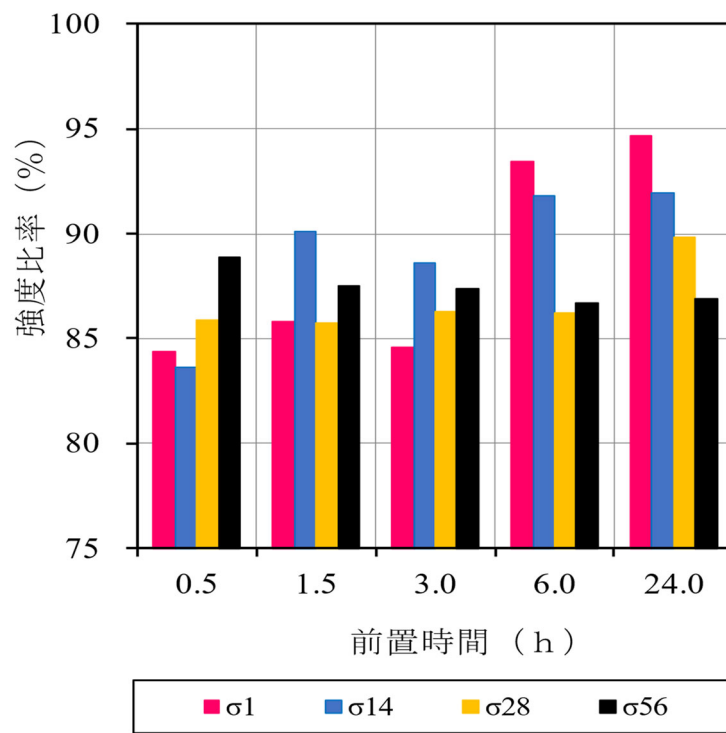


図 2-20 遠心成形に対する振動成形の強度比率

2. 3. 3 遠心供試体の硫酸浸漬試験

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。

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2-9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。

浸漬28日間後の試験結果は、図2-7と写真2-5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固めることの有効性が実証された。

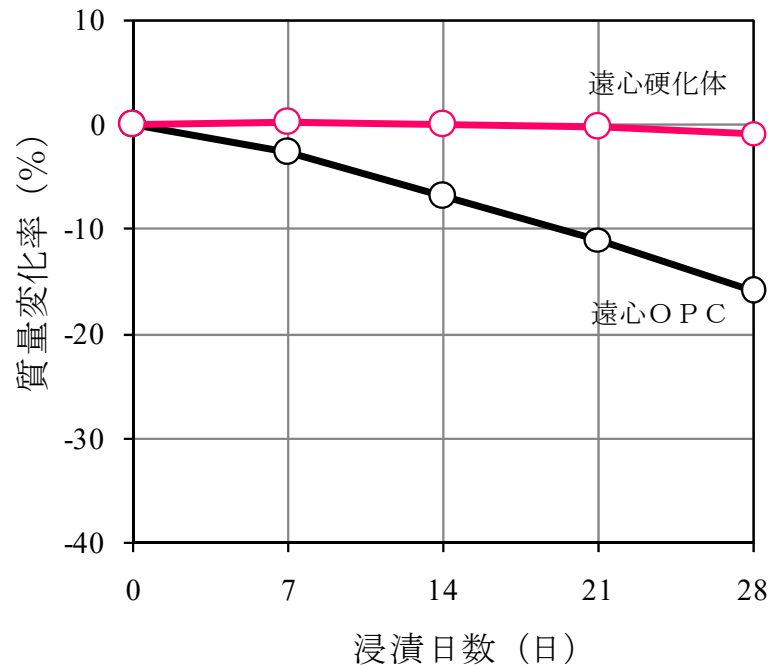


図2-7 遠心成形による IBPM コンクリート供試体の耐硫酸性



(上段：IBPM 供試体片と側面、下段：OPC 供試体片と側面)

写真 2-5 硫酸浸漬後の遠心成形供試体片の状態

次に、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 2-21 に各種供試体の配合を示す。

浸漬試験の結果は図 2-22 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 2-6 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 は他よりも圧縮強度が約 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 低いにもかかわらず、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。

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ことが原因であるものと考えられる。

浸漬試験の結果から、セメントを混入していない 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^{2)~5)}。

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。

表 2-21 各種遠心成形コンクリート供試体の配合

種別	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)					圧縮強度 σ_{28} (N/mm ²)
		W	B	S	G	SP	
IBPM	31	161	520	665	977	4.16	42.2
OPC	31	147	470	735	1078	4.70	63.5
BB	31	147	470	728	1068	4.70	68.8
FC	31	147	470	718	1052	4.70	65.3



IBPM



OPC



BB



FC

写真 2-6 硫酸浸漬後における各種遠心成形コンクリート供試体の腐食劣化状態

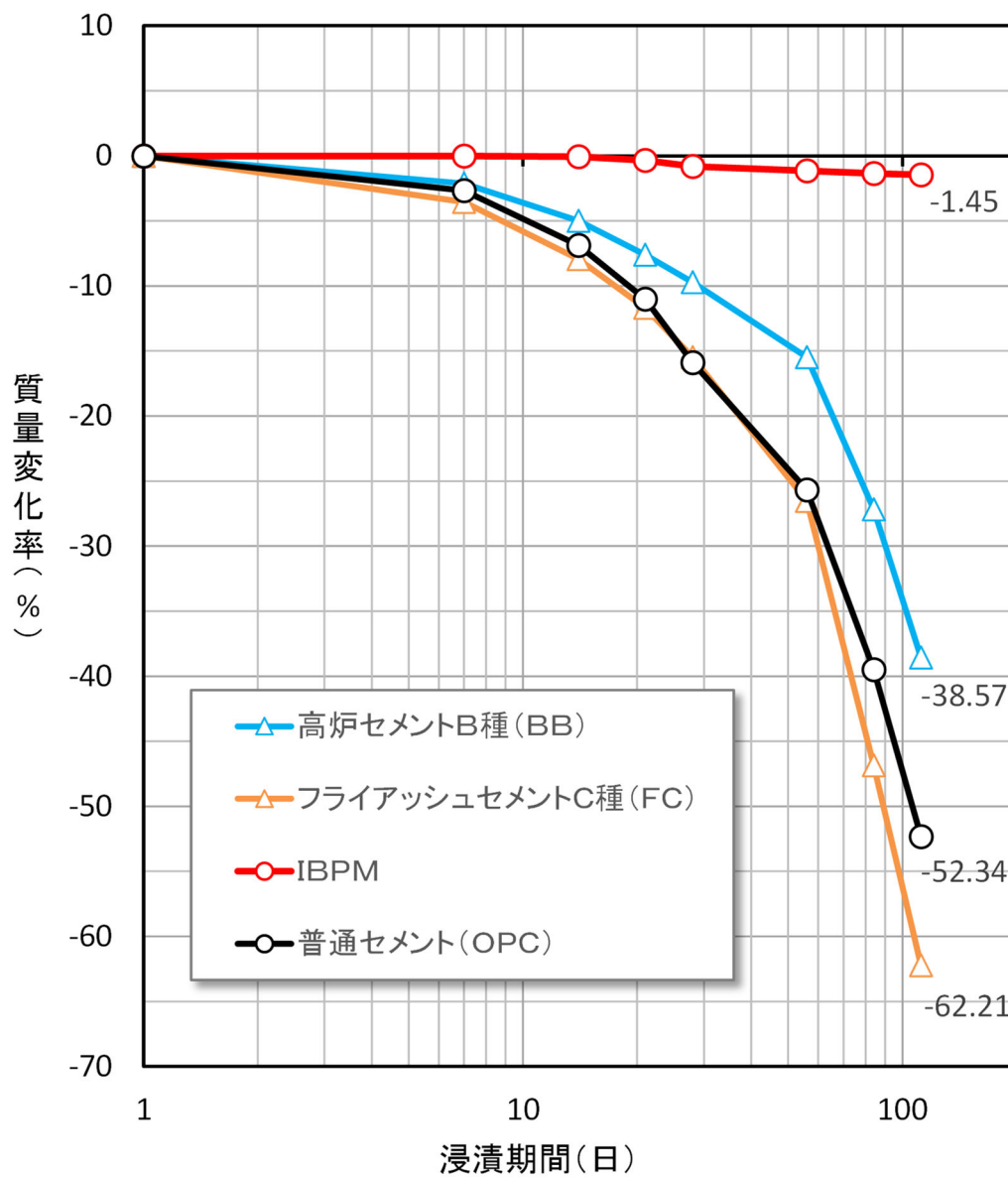


図 2-22 硫酸浸漬試験による各種遠心成形コンクリート供試体の質量変化率

2. 3. 4 長期強度特性

前述のとおり、IBPM 結合材は FA と BFS を主材料とし、これに SF と SA を加えた計 4 種類の産業副産物を用いており、更に CH と EX で構成している。このため、IBPM コンクリートでは、FA によるポズラン反応と BFS による潜在水硬性により、OPC によるセメントコンクリートよりも長期的な強度増進効果が得られるものと推察した。

このことを検証する目的で、表 2-22 に示す配合条件で IBPM コンクリートと OPC コンクリートの円柱供試体（直径 100×高さ 200mm）を作製し、蒸気養生後に気中養生（気温 20℃、湿度 60%）と水中養生（水温 20℃）に区分して養生を行い、長期材齢における圧縮強度を比較した。供試体の材齢（養生期間）は IBPM コンクリート（気中養生、水中養生）が 730 日、OPC コンクリート（気中養生）が 180 日である。

表 2-22 配合条件

配合種別 養生方法	Gmax (%)	SLF or SL (cm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
						W	Binder	S	G	Sp
IBPM 水中	20	60±5	2±1.5	30	41	156	520	669	981	5.2
IBPM 気中	20	65±5	2±1.5	34	41	177	520	655	960	5.2
OPC 気中	20	18±2.5	2±1.5	39	45	175	450	781	986	4.1

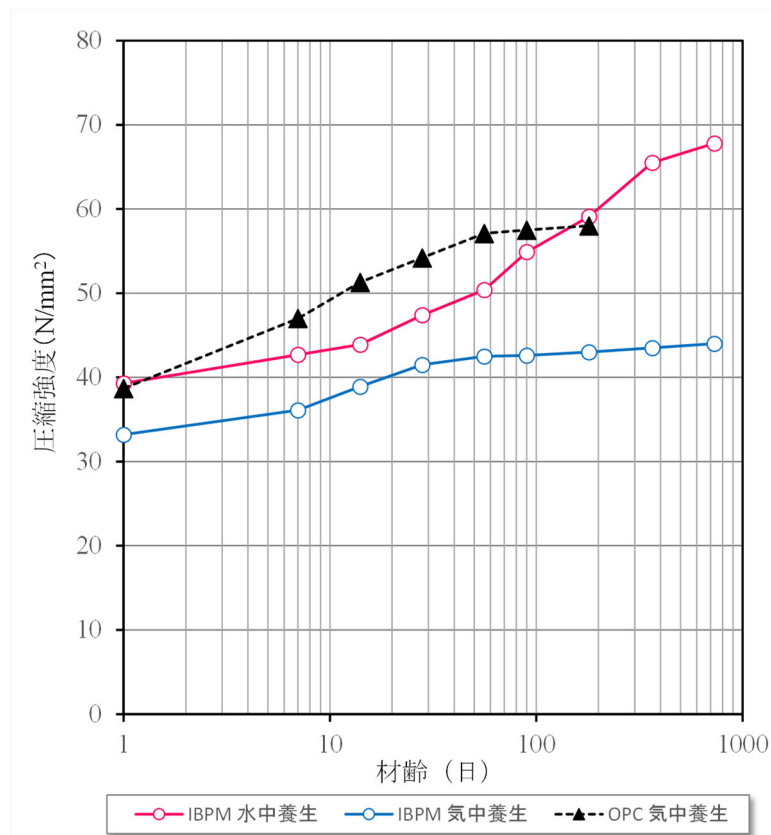


図 2-22 圧縮強度の経時変化

コンクリートの圧縮強度は、材齢 1 日（脱型後）、7 日、14 日、28 日、56 日、90 日、180 日、365 日、730 日（OPC は 180 日まで）に確認し、その経時変化を図 2-22 に示した。IBPM コンクリートの水中養生における圧縮強度は、材齢の進行に伴って材齢 730 日まで増進している。特に、材齢 56 日以降は、それ以前に比べて圧縮強度が増進する傾向が認められる。これは、水中養生によって IBPM コンクリートの水和が促進され、ポゾラン反応の効果が顕著に得られたものと考えられる。一方、気中養生における IBPM コンクリートでは、材齢 56 日までは BFS の潜在水硬性によって緩やかな強度増進は得られてきたが、それ以降の強度増進は小さい傾向にあり、配合条件（W/B）は僅かに異なるものの、気中養生と水中養生との違いが顕在化したものと考えられる。

OPC コンクリートは、強度増進が堅調に推移してきたが、材齢 56 日を境に傾きが緩やかになり、圧縮強度の伸びが小さくなっている。このことから、気中養生では材齢 56 日以降の強度増進の傾向は徐々に小さくなり、水中養生では材齢 56 日以降の強度増進が大きくなる傾向があることを改めて確認した。特に、IBPM コンクリートでは FA の混入量が多いため、水中養生によってポゾラン反応の強度増進が材齢 56 日以降に促進されたものと推察する⁹⁾。

2. 4 高強度化の検討

2. 4. 1 使用材料と配合

IBPM コンクリートの高強度化を図るために、表 2-16 に示した IBPM 結合材の混合比率を表 2-24 に示すように改良した。IBPM-1 では IBPM 結合材の 90%を FA, BFS, SF による産業副産物で占め、残る 10%を CH と EX で構成している。また、これまでは IBPM 結合材における FA と BFS の混合比率を 5:5 としていたが、目標とする圧縮強度の範囲をより高いレベルまで拡大させ、様々なプレキャストコンクリートに適用するため、BFS の混合比率の増大に伴って圧縮強度が増進することを想定して、FA と BFS の混合比率を 4:6 とした。更に、IBPM-2 では強度増進を図るために、EX の混入率を 11% に増量した。

IBPM コンクリートの配合を表 2-26 に示す。また、各コンクリートの作製では、フライアッシュ C または D を使用した。本研究では、IBPM は 5 種類という多くの材料を構成材料としているため、実用上の観点からプレミックスした状態での使用を想定している。そのため、表 2-26 の IBPM の欄には、プレミックスされた IBPM-1 または IBPM-2 を示している。

セメントを用いない IBPM コンクリートにおいては、EX はアルカリ刺激材として硬化促進の効果が期待される。そこで、IBPM 中の EX 混合比率が圧縮強度に及ぼす影響を把握する目的で、IBPM-1 を使用することを標準とし、W/B が 24%以下の一部の配合については EX を増加させた IBPM-2 を使用した。

目標とする圧縮強度の範囲 (30~80N/mm²) において、高強度域では IBPM コンクリートの水結合材比 (W/B) を著しく低くする必要がある。この場合、W/B の低減により単位結合材量 (B) が大きくなることによって、硬化時の発熱や収縮の増大、および材料コストの増加が懸念される。このことから、B を極力増加させずに W を可能な限り減少させて、W/B を下げる検討を行った。すなわち、W/B が 30% 以下の一部の配合については W を 105~130kg/m³ 程度まで減じた配合とした。

細骨材率 (s/a) については、本研究で対象とした PCa 製品をセメントコンクリートで製造する際に、通常に採用している s/a 41%を基本とした。また、配合 No.21 は、ヒューム管 (推進管) の 2 層目 (管の内側) の打込みに用いられる配合であり、内面の平滑性を高めるために s/a を若干大きく 50%とした。表 2-26 の備考欄に PCa 製品名を記載したが、これは後述する各種 PCa 製品の製造に採用した IBPM コンクリートの配合であることを示している。

配合 No.1~配合 No.7 では、W/B は 30~34%、W は 150~177kg/m³ であり、練混ぜ方法は、骨材 (G と S) と IBPM をミキサに投入して 30 秒間空練りし、W と Sp を投入して合計 3 分間練り混ぜた。

配合 No.8~配合 No.23 では、W/B を 19~30%と低くし、W を 105~140kg/m³ と大幅に低減した配合であり、前述の標準的な練混ぜ方法では流動性のある IBPM コンクリートの練混ぜが困難であった。そのため、練り混ぜ方法は、S と IBPM を 30 秒間空練りし、W と Sp を投入して、モルタルを先行して練り混ぜた。この時、モルタルの流動性が十分に得られてから G を投入したが、練り混ぜ開始から終了まで 8 分間程度を要した。

練り混ぜた IBPM コンクリートは、ブリキ製の型枠に振動を加えながら打設し、円柱供試体 (直径 φ 100×高さ 200mm) を作製した。

表 2-23 IBPM 結合材の使用材料

材料名称	記号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	種類と仕様
フライアッシュ	FA	2.20	3480	JIS A 6201 (II種)
高炉スラグ微粉末	BFS	2.91	4230	JIS A 6206 (粉末度4000)
シリカフェーム	SF	2.30	191000	JIS A 6207
膨張材	EX	3.20	4560	JIS A 6202 (石灰系)
水酸化カルシウム	CH	2.21	150000	JIS R 9001 特号
細骨材	S	2.62	—	JIS A 5005 砕砂 (硬質砂岩) 吸水率1.63% 粗粒率2.85
粗骨材	G	2.67	—	JIS A 5005 砕石2005 (硬質砂岩) 吸水率0.32% 粗粒率6.62
高性能減水剤	Sp	1.00	—	JIS A 6204 コンクリート製品用ポリカルボン酸系

表 2-24 IBPM 結合材の混合比率

種別	IBPMの混合比率(%)					
	FA	BFS	SF	EX	CH	合計
IBPM-1	33.0	51.0	6.0	6.0	4.0	100.0
IBPM-2	31.3	48.2	5.6	11.1	3.8	100.0

2. 4. 2 供試体の作製方法

供試体の作製は、ブリキ製の円柱型枠にコンクリートを打設し、テーブルブルバイブレーターで振動を掛けて密実に充填した。供試体は型枠のまま表 2-25 に示す蒸気養生を行い、翌日脱型して標準恒温恒湿室（気温 20℃、湿度 60%）内で所定の材齢まで気中養生で保管した。

表 2-25 蒸気養生条件

前置時間	6h
昇温条件	20℃/h
最高温度	65℃
保持時間	4h
降温条件	自然降温

2. 4. 3 養生方法

蒸気養生条件は、前置 6 時間、昇温 20°C/時間、最高温度 65°C、保持時間 4 時間、自然降温で行った。これは前述した IBPM の凝結時間に準じたものである。

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。

2. 4. 4 圧縮強度と水結合材比

図 2-23 は、表 2-26 に示す配合の IBPM コンクリートについての材齢 14 日の圧縮強度と結合材水比 (B/W) との関係として示したものである。養生方法は、表 2-25 に示した蒸気養生とし、蒸気養生後は材齢 14 日まで気中養生とした。なお、フライアッシュとしては C および D を使用した。

同一 B/W で比較すると、膨張材の混入率を増加させた IBPM-2 の方が圧縮強度は大きくなる傾向が認められた。また、圧縮強度が 60N/mm²以上の IBPM コンクリートの製造においては EX を増加させた IBPM-2 を用い、W/B を 19%まで低減させることで、圧縮強度が 80N/mm²の IBPM コンクリートの製造が可能であることが明らかとなった。なお、今回使用したフライアッシュ (C および D) では、フライアッシュの種類による明確な影響は認められず、前述したモルタル実験による知見と整合する結果であった。

図 2-23 の結果より、IBPM コンクリートの圧縮強度と B/W との関係は、IBPM 中の膨張材混入率の違い (IBPM-1 および IBPM-2) により、異なる直線で概ね近似できることが分かる。したがって、圧縮強度が 30~80N/mm²の範囲では、IBPM コンクリートはセメントコンクリートと同様に、結合材の種類に応じて結合材水比による配合設計が可能であるものと考えられる。

前述したように、本研究では水結合材比が低減することによる結合材の増量を抑えるために、単位水量を大幅に低減している。その結果、圧縮強度が 80N/mm²の IBPM コンクリートにおいて、単位水量を 105~110kg/m³と極めて少なくすることで、所要のワーカビリティを確保しつつ、結合材量の増加を抑制することが可能となることが明らかとなった。

以上の結果から、コンクリートの目標強度に応じて膨張材の混合比率の異なる IBPM を選定して用いることによって、30~80N/mm²の強度範囲の IBPM コンクリートを製造することが可能であるといえる。

なお、単位水量 (W) が極めて少なく、低 W/B のコンクリートの練り混ぜが可能になったのは、シリカフューム (SF) による空隙充填効果¹⁰⁾が一因であると考えられる。これと同時に、SF と FA の粒径によるボールベアリング効果^{11~14)}が得られたものと推察される。また、IBPM コンクリートの良好な流動性は、高性能減水剤 (Sp) を増量した効果であると考えられる。

表 2-26 IBPM コンクリートの高強度化に向けた配合検討結果

配合 No	IBPM の種類	FA 発電所	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					air (%)	Slump (cm) (slump flow)	備考
					W	IBPM	S	G	SP			
1	1	C	34.0	41	177	520	655	960	5.20	1.9	(61.0)	—
2	1	C	33.0	45	150	455	770	961	4.55	1.8	16.0	—
3	1	C	32.7	41	170	520	639	959	5.72	1.9	(60.0)	—
4	1	C	31.6	41	156	494	678	994	4.94	1.6	14.5	—
5	1	C	31.0	41	161	520	665	977	4.16	1.7	(45.0)	—
6	1	D	30.0	45	150	500	750	934	6.00	1.6	(53.5)	—
7	1	C	30.0	41	150	500	678	944	4.00	1.5	(55.0)	—
8	1	D	30.0	41	120	400	757	1111	5.20	1.6	16.5	マンホール
9	1	C	28.0	41	140	500	697	1021	7.00	1.6	(56.0)	—
10	1	D	28.0	45	112	400	841	1066	5.60	1.7	(48.0)	—
11	1	D	26.0	45	130	500	773	982	5.00	1.4	(54.5)	—
12	1	D	25.9	41	114	440	747	1095	6.60	1.4	8.0	ヒューム管(開削管)
13	1	D	25.1	41	138	550	678	994	6.60	1.6	(54.0)	—
14	1	D	24.0	41	132	550	681	1001	6.60	1.7	(53.5)	—
15	1	D	23.1	41	127	550	686	1009	6.60	1.8	(53.0)	—
16	1	D	22.1	41	124	560	686	1007	7.28	1.6	(53.5)	—
17	2	D	24.0	41	120	500	715	1049	8.00	1.5	(62.0)	—
18	2	D	23.1	41	120	520	707	1036	8.58	1.4	(63.5)	—
19	2	D	22.0	50	108	490	895	912	8.33	1.4	(55.0)	ヒューム管(推進管)
20	2	D	21.1	45	116	550	770	959	11.55	1.6	(59.5)	セグメント
21	2	D	21.1	45	116	550	770	959	10.18	1.6	(48.0)	ボックスカルバート
22	2	D	20.0	41	110	550	707	1039	9.90	1.7	(55.5)	—
23	2	D	19.1	41	105	550	713	1046	11.83	1.9	(54.0)	—

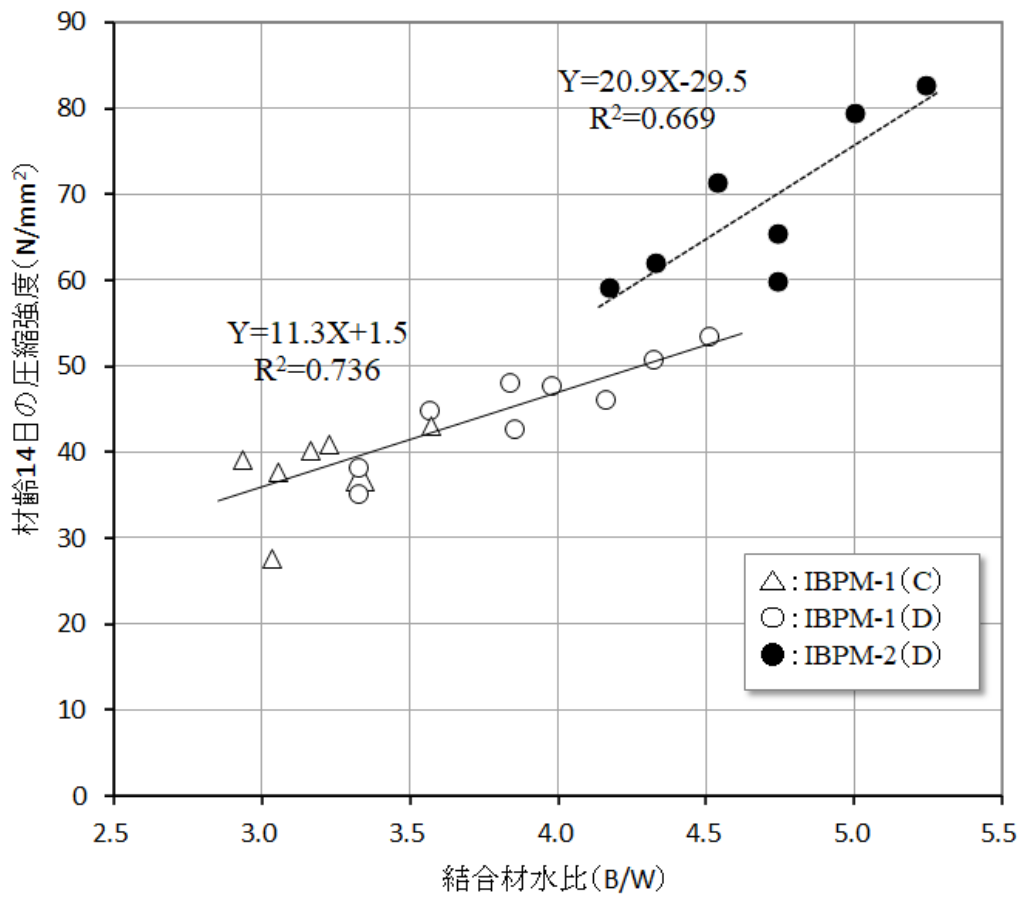


図 2-23 IBPM コンクリートの結合材水比と圧縮強度の関係

2. 5 まとめ

本章では、IBPM 結合材に用いた産業副産物の種類、アルカリ刺激剤の選定、SA と CH 混入量を決定するための検討を行うと共に、凝結試験や耐硫酸性の確認を IBPM モルタルで行った。また、IBPM 結合材の硬化メカニズムを解明する目的で、ペーストによる顕微鏡観察を行った。

その後、IBPM コンクリートに移行し、遠心成形によって作製した円筒形の遠心供試体と振動成形によって作製した円柱供試体について、圧縮強度に及ぼす蒸気養生条件（前置時間）に着目して検討した。また、双方の供試体の耐硫酸性について、5%濃度の硫酸水溶液に浸漬して評価した。

これらの結果から、以下の知見が得られた。

2. 5. 1 IBPM モルタル実験結果

- ①IBPM 結合材のアルカリ刺激剤として、GY（二水石膏）、CH（水酸化カルシウム：消石灰）、LPS（石灰石微粉末）の効果についてモルタルによる圧縮強度で検討した結果、CH を用いたモルタルの強度発現性が最も良好であった。この結果を踏まえて、IBPM 結合材には FA、BFS、SF、SA の産業副産部にアルカリ刺激剤として CH を用い、硬化後の収縮低減効果を期待して EX を加えた計 6 種類の材料を使用することを決定した。
- ②IBPM の材料構成として、BFS と FA の混合比率を 50 : 50 とし、SA の混入率を 5%、アルカリ刺激剤には CH を 4% とした。このモルタル配合により、材齢 28 日の圧縮強度が 35N/mm² 程度となることが明らかとなった。
- ③5%濃度の硫酸水溶液に供試体を 28 日間浸漬した結果、OPC 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% に達した。これに対して、IBPM 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。
- ④凝結試験の結果、IBPM の始発は 14 時間、終結は 19 時間であり、普通コンクリート（OPC）の標準的な凝結時間（始発 4 時間、終結 6 時間）に比べて大きく遅延した。その理由としては、FA のポゾラン反応と BFS の潜在水硬性によって IBPM の硬化速度が遅いこと。また、SA が含有するリンによる硬化遅延が影響していることが考えられる。
- ⑤粉末 X 線回折によって IBPM からは、CSH（カルシウムシリケート水和物）、Ett（エトリンガイト）、Q（石英）、Mu（ムライト）の 4 種類が同定された。このうち、Ett は IBPM に混入した膨張材に由来し、Q と Mu はフライアッシュに由来するものと考えられる。これらのことから、IBPM の硬化は「ケイ酸カルシウム水和物」CSH によるものであると推察される。
- ⑥フライアッシュの品質
フライアッシュのブレン値の増加に伴い、また 45 μ m 残分の減少に伴い、活性度指数は増加する傾向にあった。IBPM モルタルの圧縮強度は、ブレン値に伴う圧縮強度の変化に殆ど表れていない。また、フライアッシュの 45 μ m 残分が IBPM モルタルの圧縮強度に及ぼす影響も極めて小さかった。

モルタル試験の結果から、FAの品質変動がIBPMコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響は、OPCにFAを混入する場合と比較して小さく、本研究に用いたFAの範囲内では、実用上無視できる程度であることが示唆された。

2. 5. 2 IBPMコンクリート実験結果

- ①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。
- ②遠心成形で作製したIBPM遠心硬化体と、OPC遠心供試体を対象にした5%硫酸浸漬試験(112日間)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。
- ③浸漬後112日までの供試体の質量変化率は、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。
- ④IBPMコンクリートの水中養生における圧縮強度は、材齢の進行に伴って材齢730日まで増進している。特に、材齢56日以降は、それ以前に比べて圧縮強度が増進する傾向が認められる。これは、水中養生によってIBPMコンクリートの水和が促進され、ポズラン反応の効果が顕著に得られたものと考えられる。
- ⑤気中養生におけるIBPMコンクリートでは、材齢56日まではBFSの潜在水硬性によって緩やかな強度増進は得られてきたが、それ以降の強度増進は小さい傾向にある。OPCコンクリートは、強度増進が堅調に推移してきたものの、材齢56日を境に傾きが極めて緩やかになり、それ以降の圧縮強度の伸びは殆ど確認できない。

2. 5. 3 IBPMコンクリートの高強度化結果

- ①単位水量(W)を 120kg/m^3 以下、水結合材比(W/B)30%以下、混和剤添加率(B×%)1.2%以上とすることで単位結合材量(B)の低減を図ることが可能であり、IBPMコンクリートの圧縮強度を 50N/mm^2 以上の高い強度レベルにまで向上できる。
- ②上記①によって、IBPMコンクリートによって圧縮強度が $30\sim 80\text{N/mm}^2$ のプレキャストコンクリート製品の製造が可能である。
- ③単位水量(W)が極めて少なく、低W/Bのコンクリートの練り混ぜが可能になったのは、シリカフェーム(SF)による空隙充填効果が一因として考えられ、SFとFAの粒径によるボールベアリング効果が得られたものと推察される。また、高性能減水剤(Sp)の増量によって良好な流動性が得られた

ものと考えられる。

- ④IBPM コンクリートの圧縮強度と水結合材比 (W/B) は線形関係にあり，両者の関係は IBPM 中の膨張材 (EX) の混合比率に応じて異なる直線で表すことができる。
- ⑤IBPM コンクリートは圧縮強度が $30\sim 80\text{N/mm}^2$ の範囲では，セメントコンクリートと同様，結合材水比 (B/W) による配合設計が可能である。

参考文献【第2章】

- 2-1) 前田正博, 石井義明, 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
- 2-2) 小山秀紀, 石田良平, 野中 英: 耐酸コンクリートに関する基礎実験, 土木学会第56回年次学術講演会, V-288, pp.576-577, 2001.10月
- 2-3) 大城良信, 仲本文範, 山田義智, 大城 武: 海洋環境下における石炭灰を使用したRC構造物の施工報告, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.789-794, 2002.
- 2-4) 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
- 2-5) 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
- 2-6) 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
- 2-7) 小川彰一, 野崎隆人, 山田一夫, 坂井悦郎: フライアッシュ混合セメントの耐硫酸性に及ぼすフライアッシュの特性とSO₃量および石灰石微粉末の効果, Cement Science and Concrete Technology, Vol.66, pp.414-421, 2012
- 2-8) 井手野下敏明, 鶴澤正美, 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
- 2-9) 山本武志, 金津 努: フライアッシュのポゾラン反応に伴う組織緻密化と強度発現メカニズムの実験的考察, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, pp.52-65, 2007
- 2-10) 上野 敦, 井口 舞, 大野健太郎, 宇治公隆: 密充填粉体を用いたエコセメント超硬練りコンクリートの諸性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.529-534, 2017
- 2-11) Nakamura, N. Sakai, M. Koibuchi, K. and Iijima, Y. Properties of High-Strength Concrete Incorporating Very Finely Ground Granulated Blast Furnace Slag, ACI Sp-90, Vol.2, pp.1361-1380, 1986
- 2-12) Regourd, M, Microstructure of High Strength Cement Paste Systems, Materiales Research Society Symposia Proceedings on Very High Strength Cement-Based Materials, pp.3-17, 1985
- 2-13) Khayat, K.H. and Aitcin, P.C. Silica Fume in Concrete-An Overview, ACI SP-132, Vol.2, pp.835-872, 1992
- 2-14) シリカフェームを用いたコンクリートの設計・施工指針(案): 土木学会コンクリートライブラリー80, 1995.10

第3章 IBPM コンクリートの耐久性

3. 1 まえがき

第2章では、「IBPM コンクリートの圧縮強度に及ぼす材料と種類および配合の影響」について、モルタルによる材料選定やフライアッシュの品質の影響、コンクリートの配合実験、コンクリートの高強度化に区分して記述した。その中で、IBPM 硬化体の強度発現性を遠心成形と振動成形で評価した結果について記述した。また、IBPM コンクリートの高強度化を図るために、 $W120\text{kg/m}^3$ 以下、 $W/B30\%$ 以下、 $SP1.2\%$ 以上とすることで $30\sim 80\text{N/mm}^2$ に及ぶ圧縮強度が得られることを確認した。

第3章では、IBPM コンクリートの耐久性を確認するために、収縮性状、耐硫酸性、耐塩害性、中性化、凍結融解抵抗性、すり減り抵抗性、無害でない骨材を使ったアルカリ骨材反応抑制効果について検証した。従来のコンクリート業界は新設が主体であったが、これからの時代は既設のコンクリート構造物をどの様に長く供用させていくことが重要な課題となっている。特に、新材料である IBPM コンクリートでは環境的な視点で、耐久性を評価することは必須である。

100年以上の歴史と施工実績を有するセメントコンクリートは、高耐久性を有する材料であるものの、環境条件によっては性能が徐々に劣化する。また、品質の劣った材料を使用した場合や不適切な施工を行った場合には、コンクリート構造物の劣化は短い供用年数で急速に進行する可能性がある。このため、新材料である IBPM コンクリートでは、その潜在能力を的確に評価して、IBPM コンクリートによる構造物が長期間に亘って供用できることを検証すると共に、劣化に伴う変状を未然に防ぐためには、現在の性能（耐久性）を正確に把握することが肝要である。

IBPM コンクリートの緻密な微細構造を検証するために、電子顕微鏡による水和組成観察や細孔径分布についても確認した。また、環境負荷低減効果（産業副産物の混入率、脱炭素化（ CO_2 排出量の削減率））についても検証した。このような各種特性値に関する検証は、前章で述べた耐久性と共に、IBPM コンクリートの持続可能な発展を支える非常に重要な要素である。

コンクリートは良質な材料を選定して、適切な配合設計を行い、丁寧な施工を行えば、高耐久性が得られることは広く社会に認識されるようになってきている。このため、昭和の高度経済成長期以降、繰り返されてきたスクラップ・アンド・ビルドの時代は既に終焉を迎え、適切なメンテナンスによって、老朽化したコンクリート構造物を延命化させる維持管理の時代へと移行した。近年では、環境性能や高耐久性が必須の時代となり、ゼロエミッションに貢献し、脱炭素（ CO_2 排出量の削減）が可能で、100年の高耐久性化が実現できる IBPM コンクリートのような硬化体が、今後のコンクリート業界の中心になっていくものと期待される。

3. 2 収縮性状

3. 2. 1 自己収縮

鉄筋コンクリート PCa 製品では、コンクリートの収縮に起因するひび割れが発生し、これが鉄筋腐食による劣化原因となることがある。ここでは、IBPM コンクリートの自己収縮について OPC コンクリートと比較して検討を行った。表 3-1 に IBPM コンクリートの配合 (W/B34%, W/B21%), 図 3-1 と図 3-2 に自己収縮ひずみ, 図 3-3 に凝結時間を示す。

IBPM コンクリートでは、高強度域において W/B がかなり低くなることから、自己収縮が大きくなり、ひび割れの発生要因になることが懸念される。そこで、表 3-1 に示す W/B=34%と W/B=21%の配合を対象に、100×100×400mm コンクリート供試体を振動締固めにより作製し、20°Cの環境下において自己収縮ひずみを計測した。凝結試験によって求めた始発時間 (W/B=34% : 10.0 時間, W/B=21% : 3.5 時間) を基点として自己収縮ひずみを集計した結果、IBPM コンクリートの自己収縮ひずみは材齢 63 日までに最大で W/B34%は $420 \times 10^{-6} \mu\text{m}$, W/B21%は $300 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ あった。既往の研究¹⁾²⁾によると、同等の圧縮強度レベルの OPC コンクリート (W/C=30%) の自己収縮ひずみは $400 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ 程度であることから、IBPM コンクリートの自己収縮ひずみは OPC コンクリートと同等のレベルにあるといえる。

また、IBPM コンクリートは蒸気養生が必須になるため、始発時間を考慮して配合 3 (W/B=34%, 膨張材 60kg/m³, 蒸気養生) と配合 6 (W/B=21%, 膨張材 60kg/m³, 蒸気養生) の自己収縮ひずみを比較した。配合 3 ではひずみの計測を開始した時点で蒸気養生が終了しているため、ひずみは収縮側にあり、材齢 63 日で $400 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ に至った。

一方、配合 6 では蒸気養生中 (前置時間中) からひずみの計測を開始するため、ひずみは一旦 300 μm 程度まで膨張し、以降は急激に低下して材齢 63 日で $100 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ に至っている。この結果を見ると、配合 3 よりも配合 6 の方が自己収縮ひずみは小さいため、IBPM コンクリートの高強度化により W/B を小さくした効果が表れているものと考えられる。

以上のことから、IBPM コンクリートの収縮特性は OPC コンクリートと同等であるといえる。なお、蒸気養生中に生じる自己収縮ひずみについては、今後の検討が必要である。

参考のために、自己収縮ひずみに用いた IBPM コンクリート配合の諸性状に関する情報として、図 3-4 に圧縮強度と図 3-5 に材齢 1 日の積算細孔径分布も示した。

圧縮強度は、材齢 56 日において W/B34%では 32~45N/mm², W/B21%では 54~75N/mm² を示している。このうち、蒸気養生を行った配合の圧縮強度は、脱型直後の初期材齢においては、封かん養生を行った同じ配合よりもやや高い値を示しているが、材齢 28 日で逆転している。

材齢 1 日の細孔径分布では、細孔直径と積算細孔容積との関係において、IBPM コンクリートの特性が明瞭に表れており、細孔径分布の幅が狭く、細孔直径が 0.3 μm 付近から小径側に集中している。また、封かん養生では W/B34%と W/B21%で細孔径分布の曲線が概ね二分されるが、蒸気養生を行うと両者が同様な分布状態を示している。

表 3-1 自己収縮の測定に用いた IBPM コンクリート配合

配合	W/B	s/a	W	IBPM	IBPM に含まれる 膨張材量	S	G	Sp
1	34	41	177	520	0	644	944	4.68
2	34	41	177	520	30	646	947	5.20
3	34	41	177	520	60	648	950	5.72
4	21	45	109	520	0	786	980	9.88
5	21	45	109	520	30	789	983	10.40
6	21	45	109	520	60	791	985	10.92

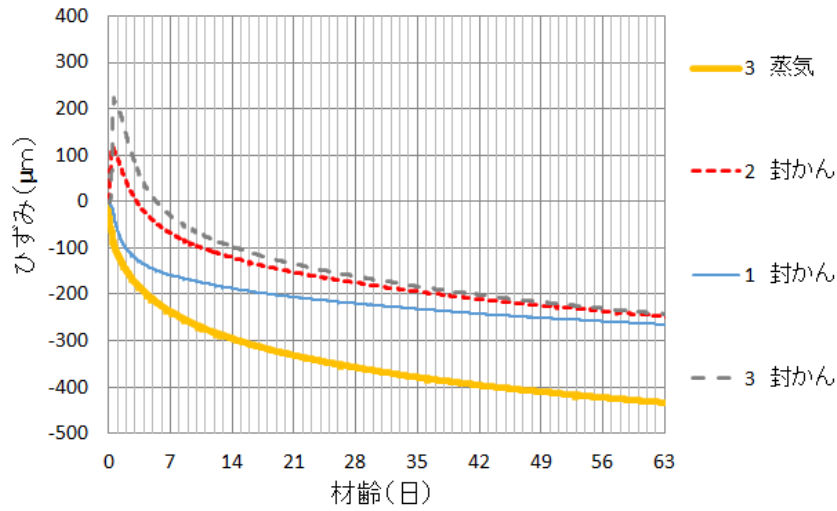


図 3-1 IBPM コンクリート (W/B34%) の自己収縮ひずみ

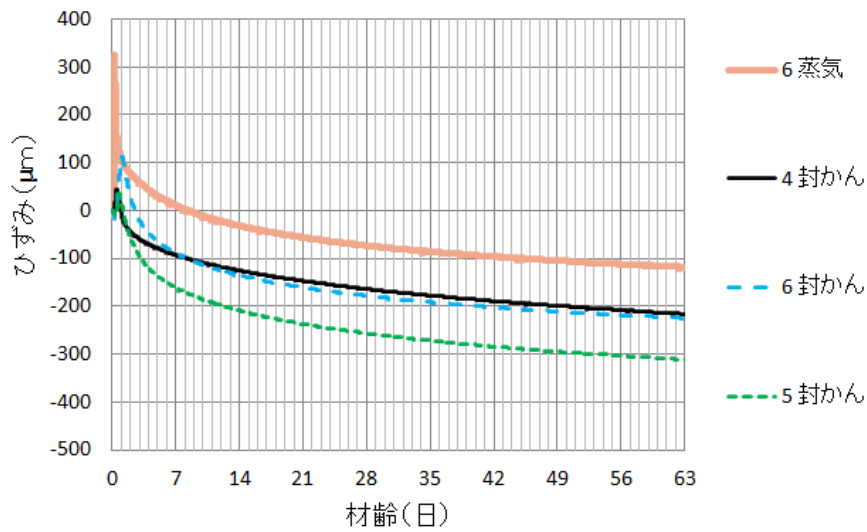


図 3-2 コンクリート (W/B21%) の自己収縮ひずみ

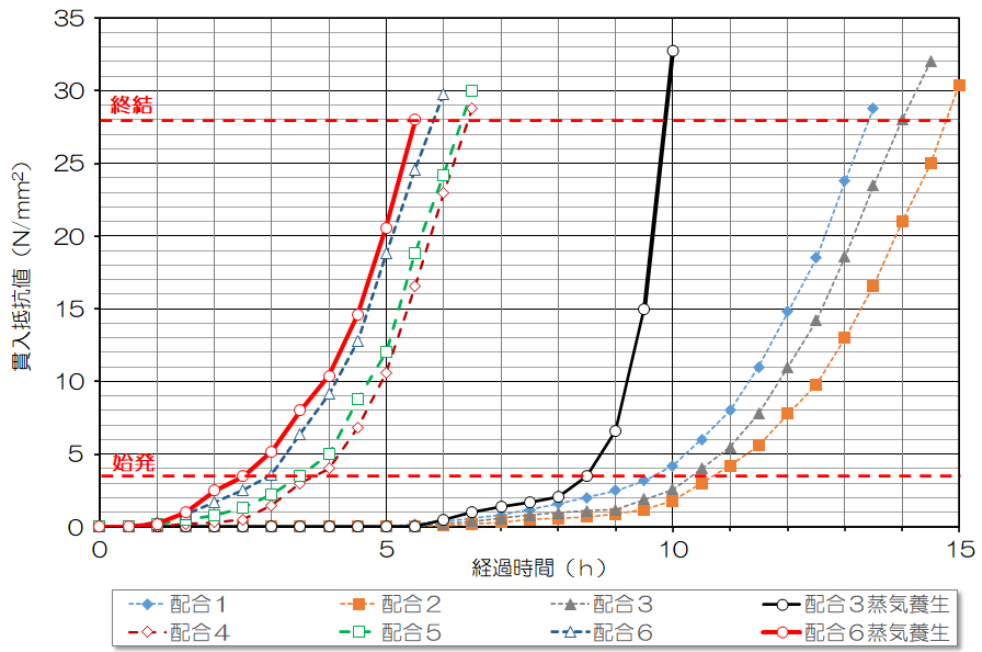


図 3-3 凝結試験結果

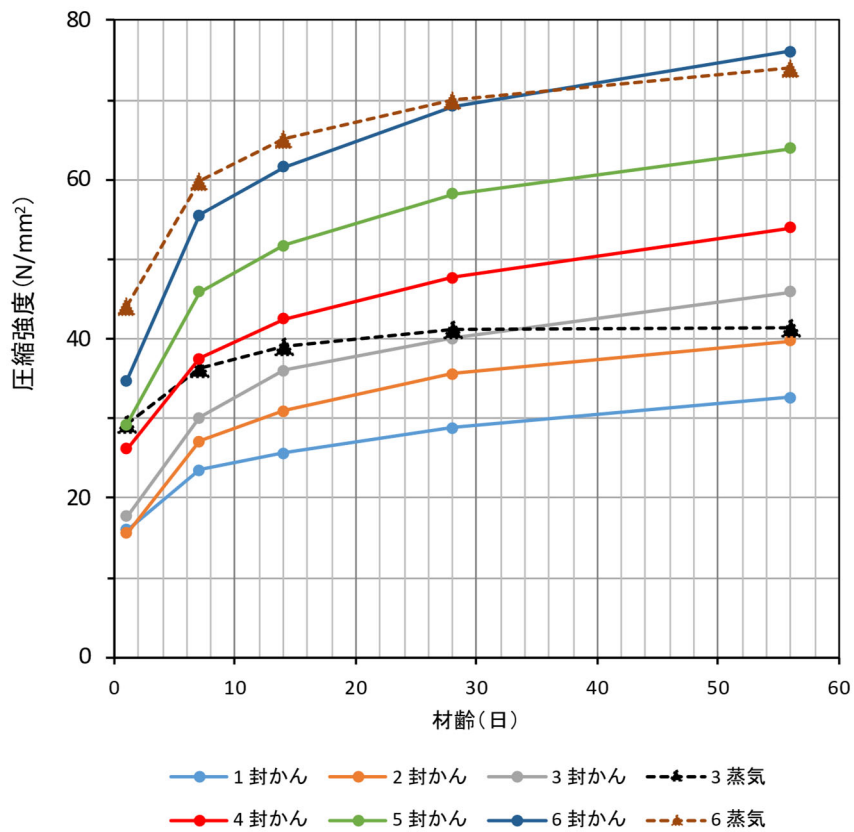


図 3-4 IBPM コンクリートの圧縮強度

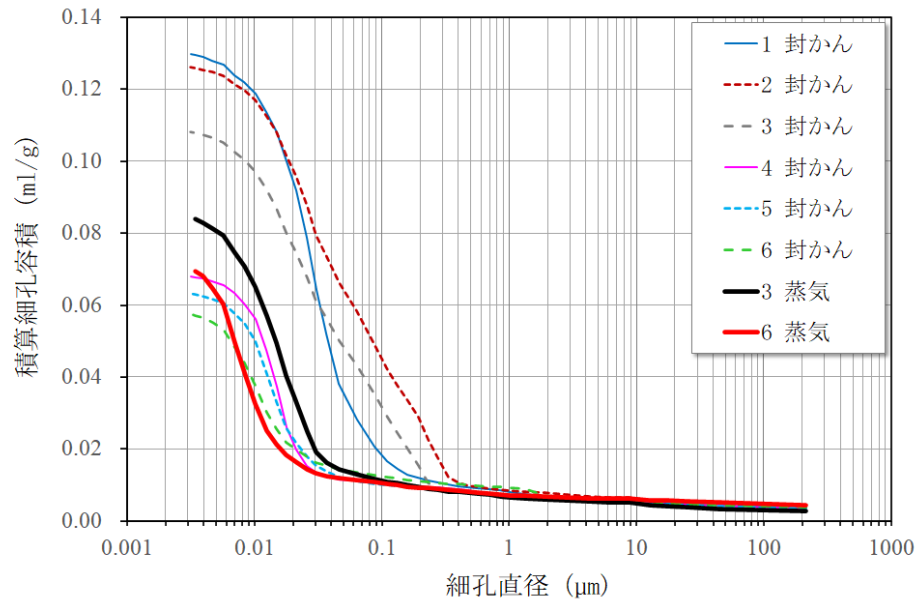


図 3-5 材齢 1 日の細孔径分布

3. 2. 2 拘束ひび割れ

拘束ひび割れ試験に用いる供試体は図3-6に示すように、異形鉄筋(D=25, L=1300mm)の中央部を長さ300mmに渡って節とリブを切削除去し、ひずみゲージを貼り付け、その上にグリースを塗布してコンクリートとの付着が無い状態とした。この鉄筋を型枠(幅100×高さ100×長さ1100mm)内に設置し、コンクリートを打設してから蒸気養生を行った。

翌日に脱型した後、供試体底面と打設面にアルミテープを貼って2面乾燥状態として、恒温恒湿室(気温20℃, 湿度60%)内に静置した。収縮ひずみの計測はこの時点から開始した。

当該供試体の構造によって、コンクリートに発生した収縮ひずみが鉄筋に伝達され、その際に発生したひずみと、コンクリートのひび割れの発生を鉄筋中央部のひずみゲージで計測する。また、コンクリートのひび割れの発生状況を目視でも確認するものである。

表3-2に示した供試体の配合を用いて、4種類(IBPM, OPC, BB, FC)のコンクリートを対象に、各々W/Bの異なる3種類の配合を設定した。ここではひび割れが発生し易い条件を想定して、比較的低い強度レベルのコンクリートを対象とした。

拘束ひび割れ試験では、鉄筋に発生した応力からコンクリートの拘束応力を求め、その結果を図3-7に示した。コンクリートの拘束応力度の曲線が急激に変化している供試体では、収縮ひび割れが発生しており、BBとFCでは材齢80日過ぎに、OPCでは材齢90日過ぎに確認されたが、IBPMでは材齢130日になって確認されたが、他の配合との差が大きいため、更なる検証を要する。また、既往の論文³⁾によると、高温(60℃)で養生させると、常温養生(20℃)に比べ剛性が増大し、収縮は低下する傾向にあり、混和材を使用すると収縮の低下率は大きくなる傾向にあることが報告されている。

各供試体に発生したコンクリートの拘束応力度は、IBPM供試体に発生した拘束応力度は材齢140日までに2~3N/mm²程度であり、他のコンクリートの70~80%程度である。これは、IBPMに混入した膨張材(EX)が収縮低減に寄与しているものと考えられる。

一方、曲げ強度に対する引張り強度の割合(曲げ/引張り)では、IBPMは2.6程度、OPCとBBは2.0程度、FCは1.7程度であることから、IBPMは強度面で最も余裕がある。

表3-2 拘束ひび割れに用いた各種コンクリートの配合

種別	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					σ ₂₈ 圧縮強度 (N/mm ²)
			W	Binder	S	G	SP	
IBPM	30	48	135	450	843	931	5.4	35.6
	35		158		814	899	5.4	32.4
	40		180		787	869	5.4	27.7
OPC	45	48	135	300	943	1041	1.8	39.0
	50		150		924	1020	1.8	35.5
	55		165		905	999	1.8	30.0
BB	43	48	150	350	898	991	2.1	34.8
	48		168		875	967	2.1	31.9
	52		182		858	947	2.1	25.3
FC	40	48	140	350	913	1008	2.1	39.8
	45		158		891	983	2.1	36.0
	50		175		869	960	2.1	29.7

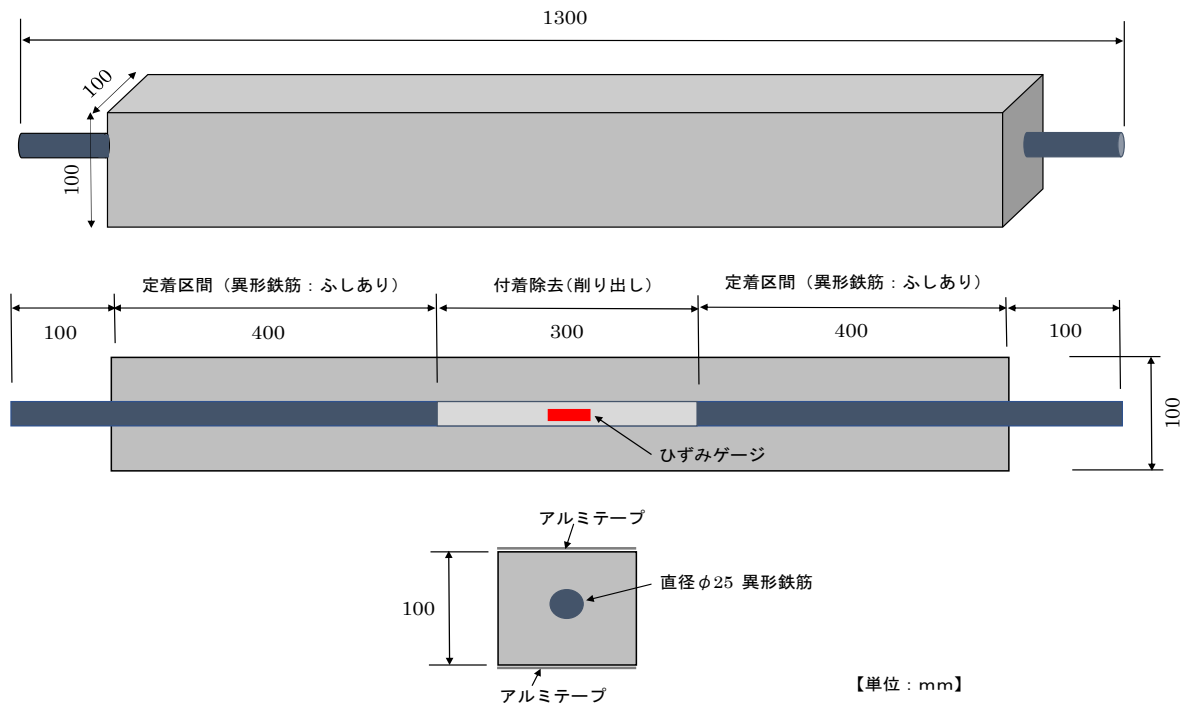


図 3-6 拘束ひび割れ試験に用いた供試体

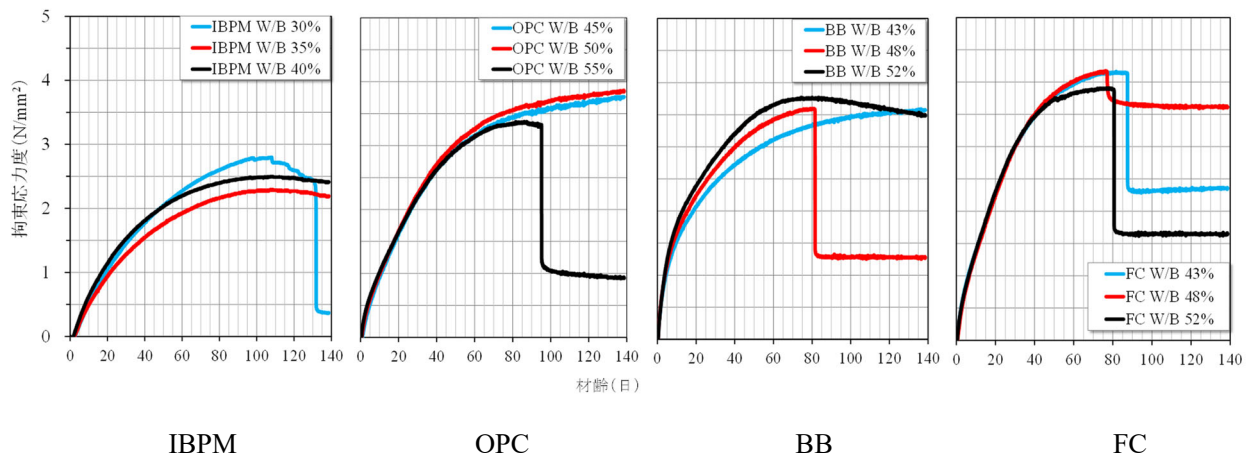


図 3-7 各種コンクリート供試体の拘束応力度

3. 2. 3 乾燥収縮

一般にコンクリートの乾燥収縮は、W/Bが高い場合ほど大きくなることから、本研究で対象としたIBPMコンクリートのW/Bの範囲内において、比較的大きい配合(W/B=30%, s/a=48%, W=135kg/m³, IBPM-1=450kg/m³, S=843kg/m³, G=931kg/m³, Sp=5.4kg/m³)で評価を行った。また、比較のため同等の圧縮強度レベルのOPCコンクリート(W/B=50%, s/a=48%, W=150kg/m³, OPC=300kg/m³, S=924kg/m³, G=1020kg/m³, Sp=1.8kg/m³)についても同様に試験を行った。なお、試験に用いたコンクリートの材齢28日の圧縮強度は、IBPMでは35.6N/mm²、OPCでは35.5N/mm²で同等である。

乾燥収縮ひずみの測定は100×100×400mmコンクリート供試体を用い、JIS A 1129のダイヤルゲージ方法で行った。コンクリートを打設後、蒸気養生を行い、材齢1日で脱型した直後を基長とした。以降、20℃, R.H.60%の環境下における乾燥収縮ひずみを計測した結果を図3-8と図3-9に示す。IBPMコンクリートの乾燥収縮ひずみは、乾燥期間180日で500×10⁻⁶程度であり、OPCコンクリートと同等であるといえる。なお、既往の研究⁴⁾によと、養生の初期に高温で養生したものほど乾燥収縮ひずみは小さくなることが報告されており、IBPMコンクリートのように蒸気養生が前提となる硬化体の乾燥収縮抑制には有効であるものと考えられる。

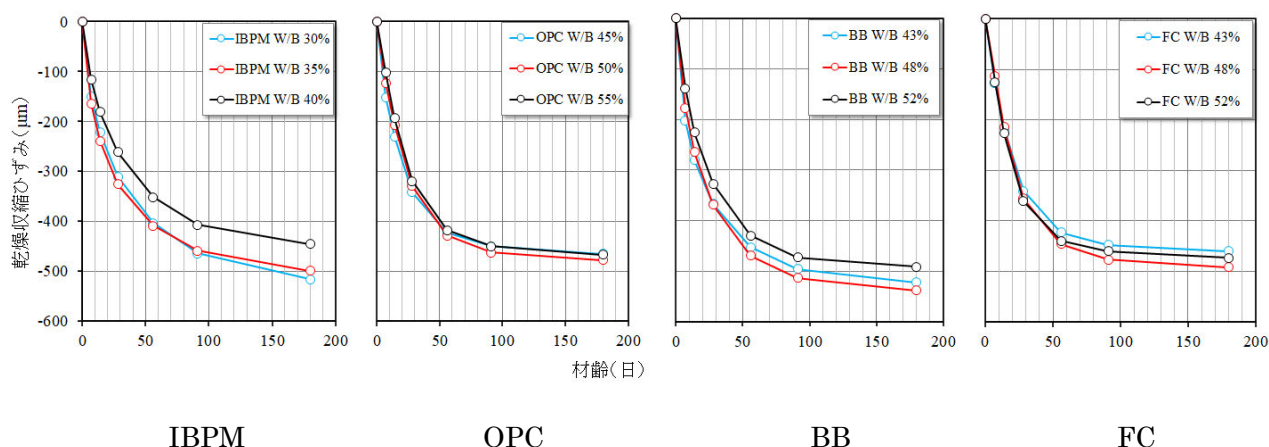


図3-8 各種コンクリート供試体の乾燥収縮ひずみ

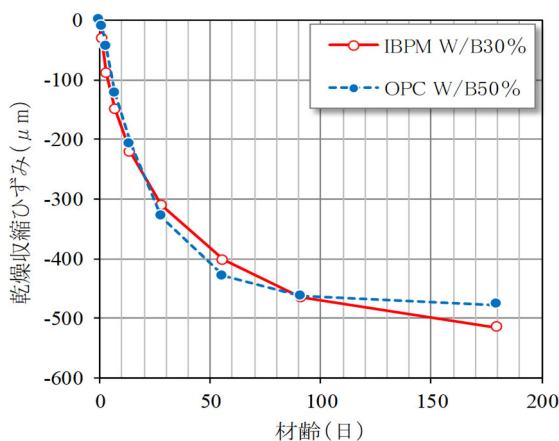


図3-9 IBPM (W/B30%) と OPC (W/B50%) の乾燥収縮ひずみ

3. 3 耐硫酸性

PCa 製品が下水道施設等に使用される場合を考慮し、IBPM コンクリートの耐硫酸性について評価を行った。ここでは、成形方法による影響も比較するために、振動締固めまたは遠心力締固めにより供試体を作製し、蒸気養生を行った。このコンクリート供試体を 5%濃度の硫酸水溶液中に 112 日間浸漬して、耐硫酸性（供試体の質量変化率）⁵⁾を確認した。

遠心成形による IBPM コンクリートは、ヒューム管の推進管（2層目：内側）の配合を対象とし、円筒管内面の耐硫酸性を評価した。すなわち、遠心締固めにより円筒形の供試体（φ200×300mm）を作製し、これを図 3-10(a)に示すように、4分割して1片を採取し、内面以外をエポキシ樹脂で被覆して硫酸水溶液に 112 日間浸漬した。比較のため、OPC コンクリート（W/B=36%, s/a=41%, W=158kg/m³, OPC=440 kg/m³, S=734 kg/m³, G=1076 kg/m³, Sp=3.52kg/m³）の供試体についても同様に試験を行った。なお、試験に用いたコンクリートの材齢 14 日圧縮強度は、IBPM では 71.3N/mm², OPC では 53.2N/mm² である。

硫酸水溶液浸漬による供試体の質量変化率を図 3-11 に示す。同図には配合は異なるもの参考までに、既報⁶⁾で報告した円筒供試体全体（被覆せずに硫酸水溶液に浸漬）の測定結果も合わせて示した。IBPM コンクリート円筒管の内面の試験結果は既報の円筒管全面の結果と同様に、浸漬後の質量減少率が 1%と極めて小さかった。一方、OPC コンクリートでは、円筒管内面においても質量減少率が著しく大きかった。また、写真 3-1 に示すように、IBPM コンクリートでは、112 日間浸漬後においても概ね健全な状態にあった。これに対して、OPC コンクリートではモルタル部分が浸食され、粗骨材が露出して、劣化が進行した状況であった。

硫酸溶液に 112 日間浸漬した後に、図 3-10(b)に示すように供試体の中心部から試験片（40×40×20mm）を切り出し、欠損厚（腐食深さ）を調べた。その際に、OPC コンクリートでは腐食によって粗骨材が露出したため、粗骨材の粒子間のモルタル部分を対象に欠損厚さを計測した。また、同じ試験片を用いて、EPMA により硫黄浸入深さについて分析した。写真 3-2 と表 3-3 に示すように、欠損厚及び硫黄浸入深さは、OPC コンクリートよりも IBPM コンクリートの方が著しく小さくなっている。

振動成形による IBPM コンクリートの耐硫酸性は、円柱供試体（φ100×200mm）により評価を行った。図 3-12 に示すように、OPC コンクリートにおいては激しい硫酸劣化が発生し、質量減少率 35%であった。これに対して、IBPM コンクリートの質量減少率は 1%で、概ね健全な状態であった。写真 3-3 は 112 日浸漬後における供試体の外観を示しているが、OPC コンクリートではモルタル部分が浸食され、粗骨材が露出しているのに対し、IBPM コンクリートでは顕著な劣化は認められなかった。

以上より、IBPM コンクリートは、成形方法（振動締固め、振動締固め）によらず、OPC コンクリートと比べて優れた耐硫酸性を有しているといえる。

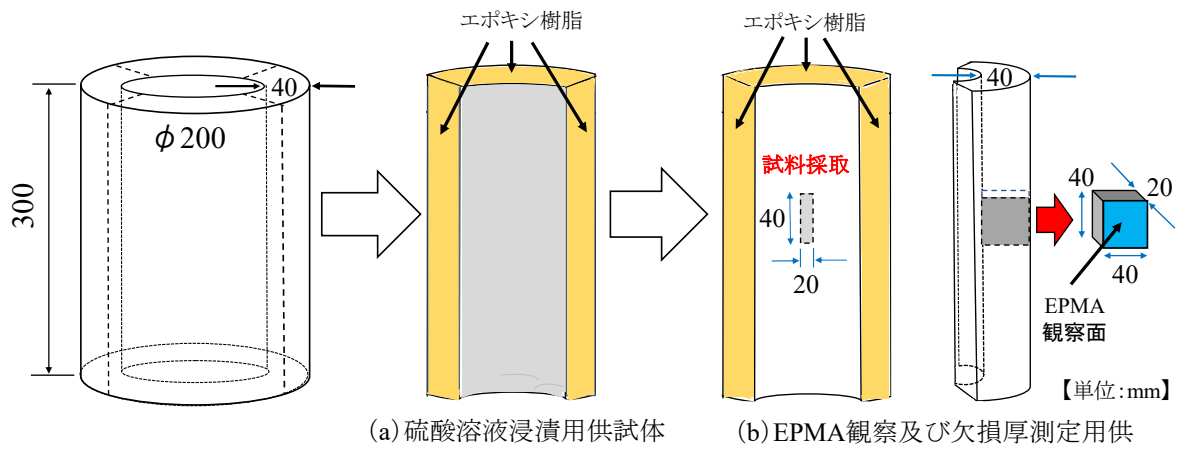


図 3-10 遠心成形供試体からの試料採取

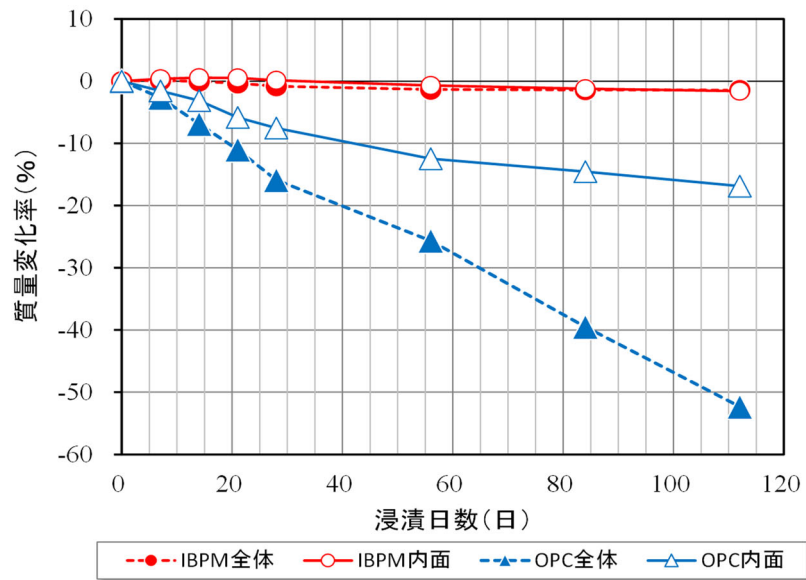


図 3-11 遠心成形供試体の硫酸浸漬による質量変化率

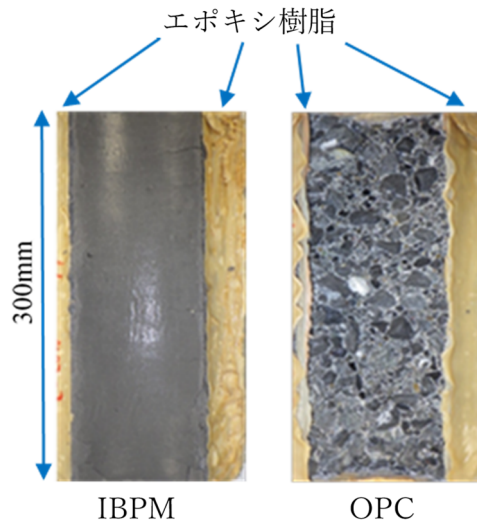


写真 3-1 硫酸浸漬後における遠心供試体内面の状態

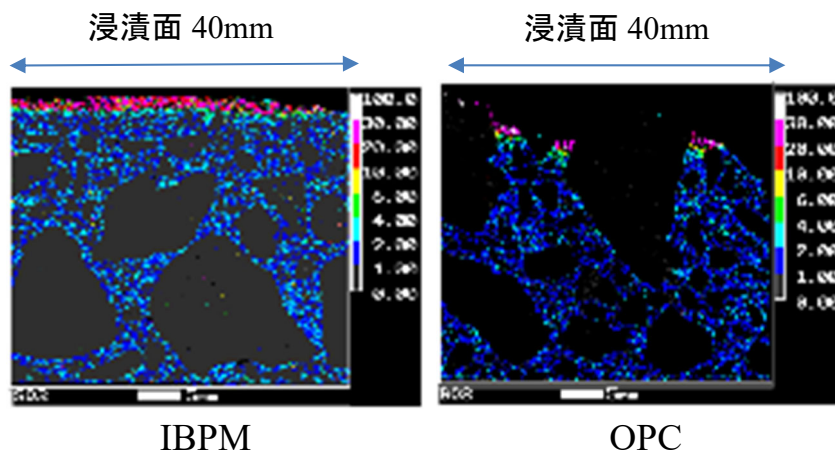


写真 3-2 EPMA 観察結果

表 3-3 遠心供試体内面の耐硫酸性

コンクリートの種別	供試体の厚さ (mm)		欠損厚 (mm)	硫黄侵入深さ (mm)
	浸漬前	浸漬後		
IBPM	40.5	39.0	1.5	7
OPC	40.4	33.3	7.1	15

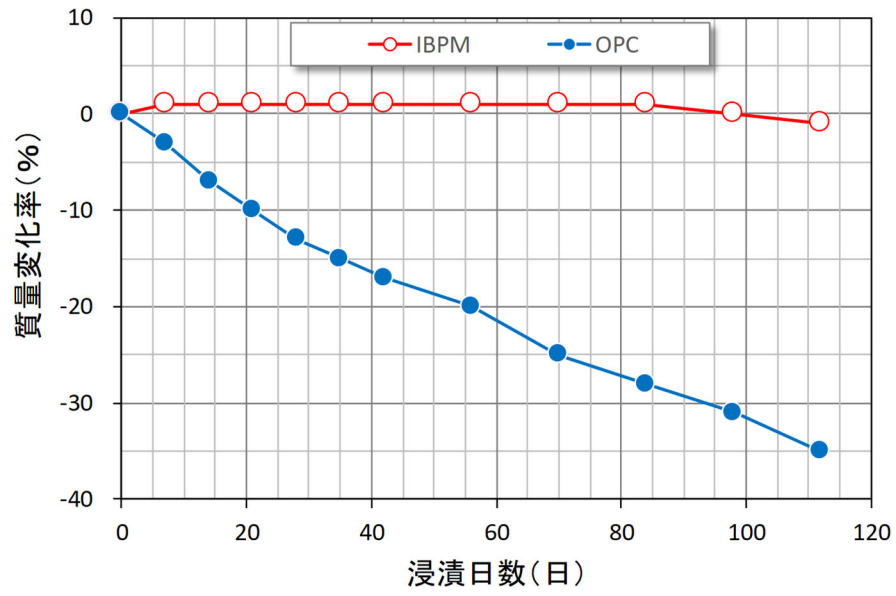


図 3-12 振動成形供試体の硫酸浸漬による質量変化率

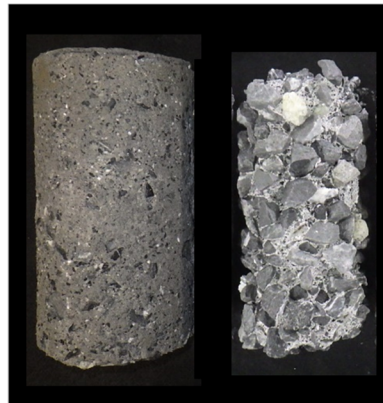


写真 3-3 硫酸浸漬後の振動成形供試体の外観
(左 : IBPM 右 : OPC)

3. 4 耐塩害性（塩化物イオン遮塩性）

PCa 製品を塩害環境下で使用する場合を考慮し、IBPM コンクリートの塩化物イオン遮塩性について、評価を行った。表 2-26 に示した No.21 (W/B21.1%) の配合を用い、表 2-25 の条件で蒸気養生を行って製造したボックスカルバート (1240×1200×1995mm) から採取したコア供試体 (φ 50×100mm) を塩化物イオン濃度 10%の水溶液に浸漬させた。また、比較のために、OPC コンクリート (W/B=38%, s/a=45%, W=160kg/m³, OPC=420 kg/m³, S=810 kg/m³, G=1009 kg/m³, Sp=4.20kg/m³) により作製したボックスカルバートからも同様にコア供試体を採取して試験を行った。なお、表 2-25 の蒸気養生を行った後に気中養生を行ったコンクリートの材齢 14 日における圧縮強度は、IBPM が 59.9N/mm², OPC が 55.5 N/mm² でほぼ同等であった。

浸漬期間が 3 カ月時点における塩化物イオン濃度の分布を土木学会の「EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法 (案)」⁷⁾ で評価した結果を図 3-13 に示す。IBPM コンクリートの塩化物イオン濃度は最大で 15kg/m³ 程度と低く、浸透深さも表面から 9mm 以下の深さに留まっているが、OPC コンクリートの塩化物イオン濃度は最大で 24kg/m³, 表面から 18mm 程度の深さまで浸透が認められる。また、同図に示した計算値 (Cl 濃度分布曲線) を基に、土木学会の「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法 (案)」⁸⁾ に準じて塩化物イオンの拡散係数を算出した。その結果を図 3-14 に示すように、IBPM コンクリートが 0.237cm²/年, OPC コンクリートが 1.319cm²/年であり、IBPM コンクリートの拡散係数は OPC コンクリートの約 18% であり、著しく小さい値であることが分かった^{9)~11)}。

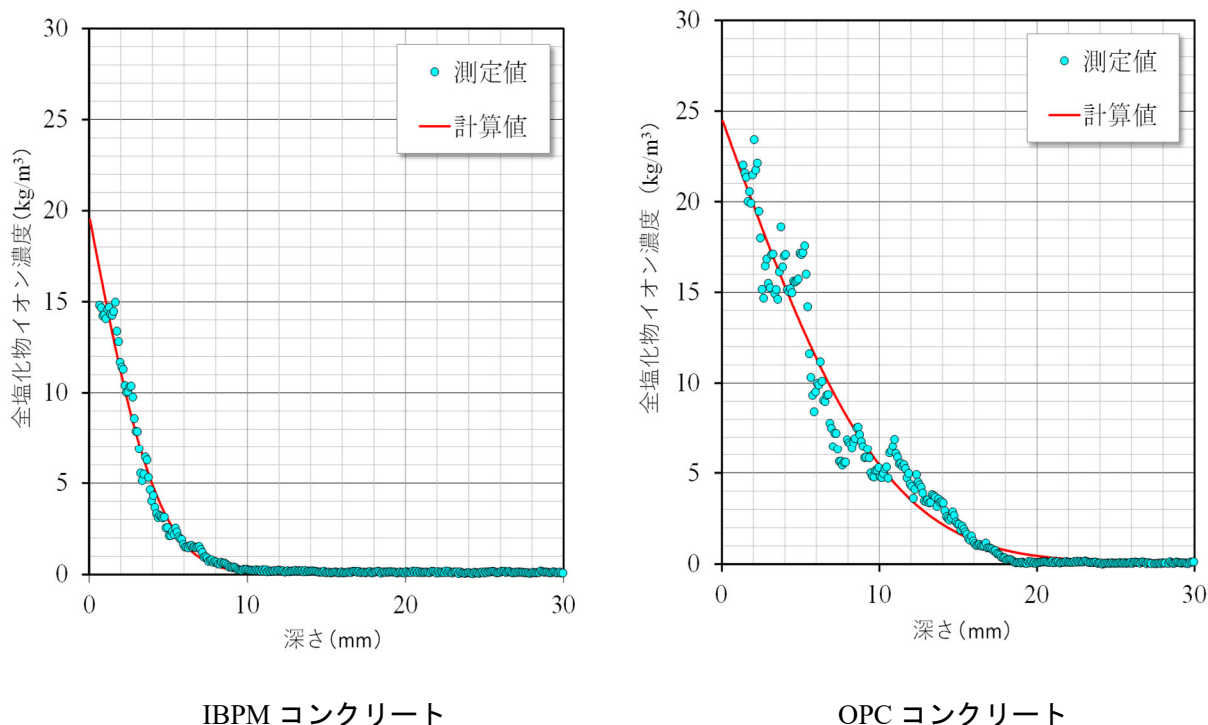


図 3-13 塩化物イオン濃度の深さ方向分布 (コア供試体)

Cl 濃度分布曲線より Fick の第 2 法則に基づいた拡散方程式(1)式を用いて、見掛けの拡散係数 D_{ap} と試料表面の塩化物イオン濃度 C_{a0} を求めた。

$$C(x,t) = C_{a0} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right) + C_i \quad (1)$$

- x : 表面からの深さ(mm)
- t : 塩水浸漬期間 (年) 本試験では 0.25 年および 1 年
- $C(x,t)$: 深さ x mm、期間 t 年において測定された塩化物イオン濃度(%)
- C_{a0} : 試料表面の塩化物イオン濃度(%)
- D_{ap} : 見掛けの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)
- C_i : 初期に含有される塩化物イオン濃度(%)
- erf : 誤差関数

なお、EPMA により測定される Cl 濃度は、(1)式左辺の $C(x,t)$ となる。

拡散係数の計算においては、Cl 濃度分布曲線のうち、Cl 濃度が最大になった深さよりも内部側の範囲を採用した。また、初期に含有される塩化物イオン濃度 C_i は、濃度がほぼ一定となった範囲の平均値とした。なお、単位容積質量は、依頼者提供の配合表の値を用いた。

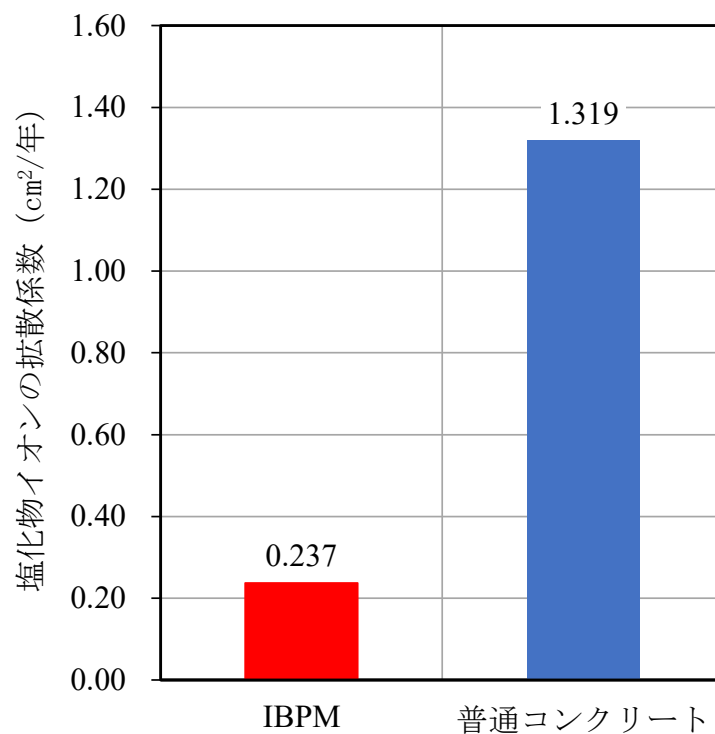


図 3-14 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

3.5 中性化抵抗性

3.5.1 促進中性化試験

JISに規定されている促進中性化試験は、材齢26週（182日間）に亘り中性化環境（温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $60\pm 5\%$ 、二酸化炭素濃度 $5\pm 0.2\%$ ）に供試体を曝露して、中性化深さを評価するものである。当該試験方法はセメントコンクリートを対象としたものであるため、カルシウム成分を殆ど含まないIBPMや混合セメントなどの中性化を評価するには、その妥当性が疑問視されている。このため、環境保全に有効な材料の普及を妨げる結果となっている。更に、近年では中性化と鉄筋の腐食との因果関係までも改める動きが見られるようになってきているのが実情であり、中性化の進行によって引き起こされると考えられて来た「鉄筋の腐食」と「コンクリートのひび割れ」は、中性化が直接の原因ではないことが言われ始めている。

(1) 独自法（浸漬法）の検討

本研究では独自の方法で促進中性化試験を行い、従来の促進中性化試験との比較を行って新しい評価方法を提案することを試みた。

供用中のコンクリート製品は風雨に曝されており、降雨によってコンクリート製品に浸透した雨水が中性化の進行を遅延させる可能性がある。このことを想定し、独自の試験条件を設定して促進中性化試験を行うことを計画した。

① 降雨量の設定

- ・熊谷市で日降水量が1mm以上の日数は年間95.4日。
- ・熊谷市の年間降水量は1243mm

※出展：理科年表（平成20年国立天文台編：1971年から2000年までの平均値より）

- ・ $365\text{日} / 95.4\text{日} = 3.8\text{日}$ より、概ね週に2回は1mm/日以上の降雨がある。
- ・1回に降る雨量は $1243\text{mm} / 95.4\text{日} = 13.0\text{mm} / \text{回}$ となる。
- ・13mm/回の雨が6時間に集中して降ると仮定すると、約2mm/hとなる。
- ・2mm/hの雨の感覚は以下のとおりである。
 - 1) 弱いから普通くらいの雨で、大抵の人が傘を差す雨量。
 - 2) 傘がないとしっかり濡れてしまう。
 - 3) 朝からこの雨量だと運動会は中止になることが多い。

この検証では、表3-4に示すOPCモルタル製の2種類の円柱供試体（ $\phi 50\times 100\text{mm}$ と $\phi 100\times 200\text{mm}$ ）を用いて、上記の雨量データを基に表3-5に示す浸漬時間のモデルを使って暫定的に試行し、妥当な浸漬時間を求めた。

表3-4 OPCモルタル製供試体の配合

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)				
	W	OPC	S	G	SP
50	175	350	909	994	2.80

表 3-5 浸漬時間のモデル

パターン	浸漬時間	浸漬開始時刻と浸漬終了時刻
1	3 時間	8 時～11 時
2	6 時間	8 時～14 時
3	9 時間	8 時～17 時

- ② 独自法では、モルタル供試体を乾湿繰返しの条件で実施する。
- ③ モルタル供試体を表 4 に示す 3 水準で水中に浸漬させてから気中に取り出し、標準恒温恒湿室（20℃・60%）内に静置する。
- ④ モルタル供試体の質量が浸漬開始前の質量に回復する（乾く）までの時間と浸漬時間との関係を精査する。
- ⑤ 上記の結果を基に、乾湿繰返しにおけるモルタル供試体の浸漬時間を決定する。
- ⑥ モルタル供試体の質量測定は、浸漬後のモルタル供試体を標準恒温恒湿室内に静置して、ロードセルで連続して計測し、浸漬開始前の質量に回復した時点で終了する。

図 3-15 より、供試体寸法がφ50×100mm では、浸漬が 3 時間、6 時間、9 時間においてモルタル供試体の質量変化量は同等レベルにあり、浸漬前の質量に戻る（乾く）までの時間も殆ど同じである。これは供試体寸法が小さいために、3 時間浸漬することで水が飽和状態に至り、6 時間でも 9 時間でも浸漬時間の長さに関係なく、3 時間浸漬と同様な結果になったものと考えられる。

図 3-16 より、供試体寸法がφ100×200mm では、浸漬時間ごとに質量変化量は異なっており、浸漬前の質量に戻る（乾く）までの乾燥時間も浸漬時間に応じて大な差が生じている。

前述の結果を踏まえて、促進中性化試験では①φ50×100mm サイズのモルタル供試体を用いる。② 3 時間浸漬すれば供試体は水で飽和状態になり、浸漬前の質量に戻る（乾く）時間は 6 時間浸漬や 9 時間浸漬と変わらない。③実際には週に 2 回は 1mm/日以上降雨がある。このことを踏まえて、供試体を試験機から取り出して 3 時間浸漬させてから再度試験機に戻すことを毎週 2 回、月曜日と木曜日に繰り返すことを独自法の試験条件とした。

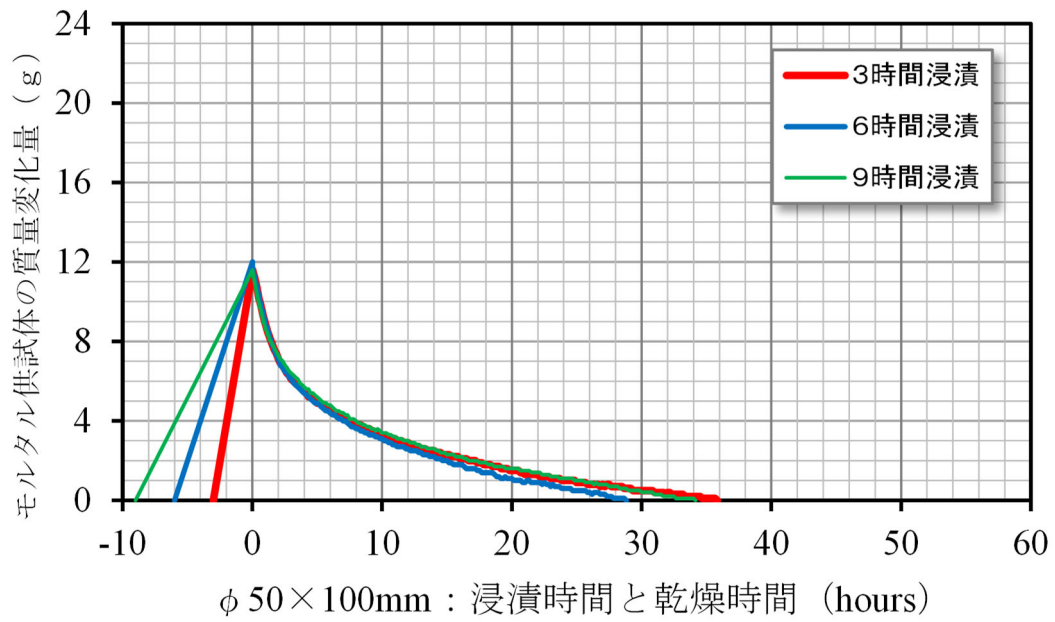


図 3-15 浸漬時間と乾燥時間におけるモルタル供試体（φ 50 × 100mm）の質量変化

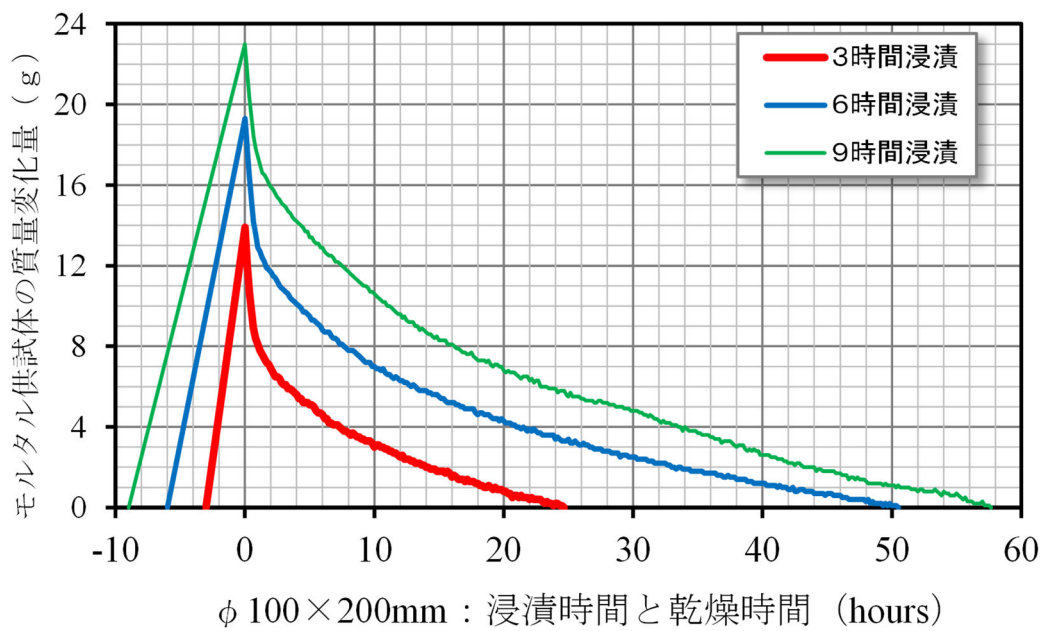


図 3-16 浸漬時間と乾燥時間におけるモルタル供試体（φ 100 × 200mm）の質量変化

独自法では、週 2 回（月曜日、木曜日）、各 3 時間供試体を浸漬することで、中性化を抑制する効果を確認した。これは、促進中性化試験前の養生方法ごとに、図 3-18 と図 3-19、図 3-20 と図 3-21、図 3-22 の中性化深さを比較すると、中性化深さは JIS 法よりも独自法の方が僅かに小さい傾向にあることが読み取れる。

中性化の進行を抑制するためには「水酸化カルシウムの添加量が有効である」という知見を踏まえて、IBPM における水酸化カルシウムの標準的な添加量は 20kg/m^3 であることから、水酸化カルシウムの添加量を 40kg/m^3 と 80kg/m^3 に増量した供試体を作製し、促進中性化試験に追加した。その結果を図 6-20 に示す。JIS 法では、中性化深さの進行によって 8 週目以降の計測が困難になっているが、独自法では 13 週目の計測も可能であり、折れ線グラフも 4 週目以降の進行が鈍化していることが顕著である。また、水酸化カルシウムの添加量は独自法では、 40kg/m^3 よりも 80kg/m^3 の方が僅かに（13 週目で 3~4mm 程度）中性化の進行を抑制しているが、JIS 法では 40kg/m^3 は 4 週目以降、 80kg/m^3 は 8 週目以降の中性化深さが計測できない状況にまで中性化深さが進行している。

促進中性化試験の結果において、グラフ内の折れ線が途中で途切れているのは、中性化深さが進行し、供試体寸法の関係からこれ以上の計測が困難になったものである。

表 3-6 モルタル供試体の配合

種別	W/B	W	B	S	G	Sp
IBPM	30	150	500	836	994	4.00
OPC	50	175	350	909	994	2.80
BB	44	175	400	882	1094	3.20
FC	42	175	420	868	1072	3.36

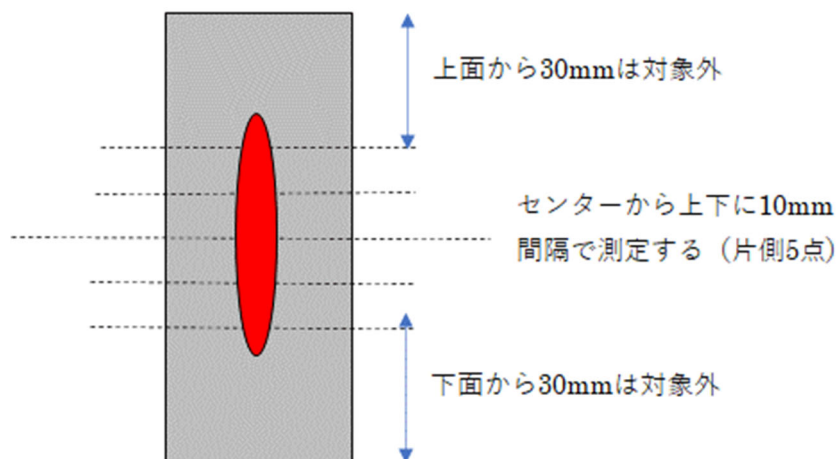


図 3-17 円柱供試体（ $\phi 50 \times 100\text{mm}$ ）における中性化深さの測定（10 カ所/個）

(2) 結合材の種類の影響

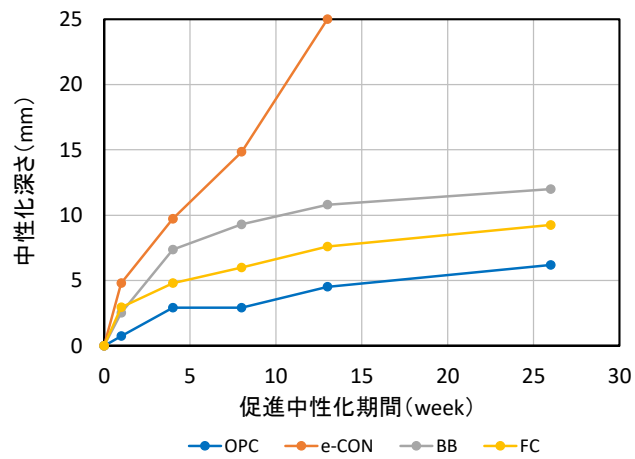
結合材の種類と中性化深さとの関係を検証する目的で、IBPM、OPC、BB、FCを対象に促進中性化試験を行った。促進中性化試験の養生条件と評価方法は表3-7に示すとおりである。

BB（高炉セメントB種）は高炉スラグ微粉末を50%混入、FC（フライアッシュセメントC種）はフライアッシュを25%混入した混合セメントを用いた。BBやFCなどの混合セメントは中性化が早いことが知られているが、IBPMと共に、OPC（普通セメント）に対してどの程度のレベルにあるのか検証することを目的とした。

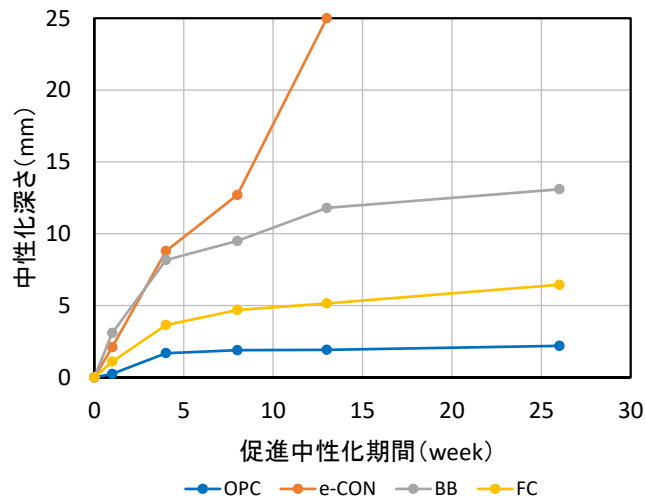
図3-16に独自法による結合材の種類と中性化深さ、図3-17にJIS法による結合材の種類と中性化深さを示す。この結果を踏まえると、独自法とJIS法の中性化深さは殆ど差異が認められず、 $OPC < FC < BB < IBPM$ の順で、中性化深さは大きくなっている。

表3-7 促進中性化試験の養生条件と評価方法

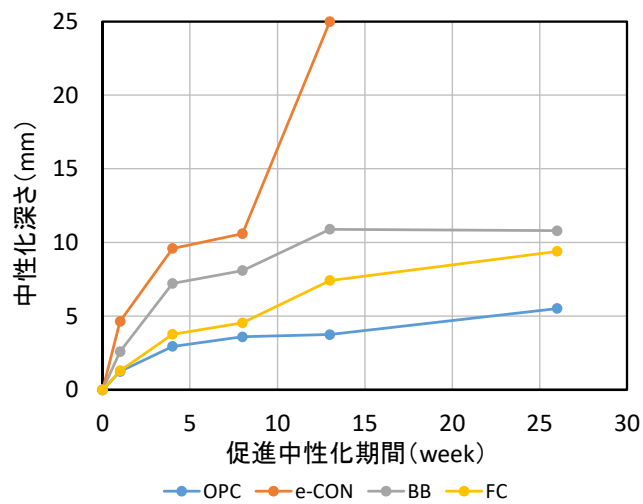
タイプ	養生条件	評価方法
A	蒸気養生後、材齢14日まで水中養生 以降、材齢28日まで気中養生	JIS法
		独自法
B	蒸気養生後、材齢28日まで水中養生	JIS法
		独自法
C	材齢28日まで標準養生 (脱型後水中養生)	JIS法
		独自法



養生方法タイプ A

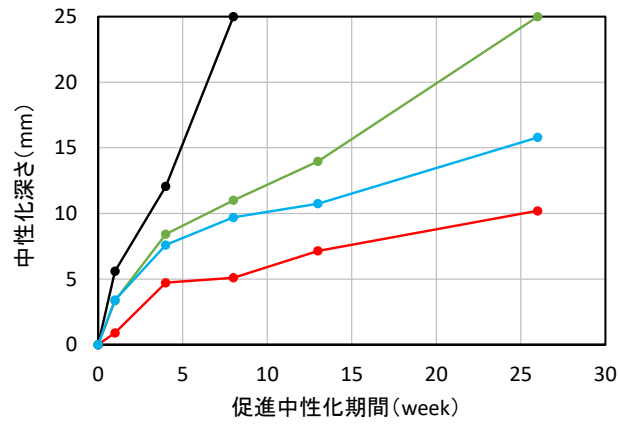


養生方法タイプ B

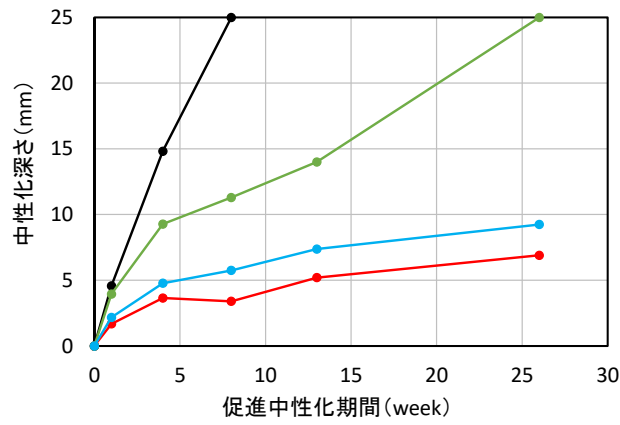


養生方法タイプ C

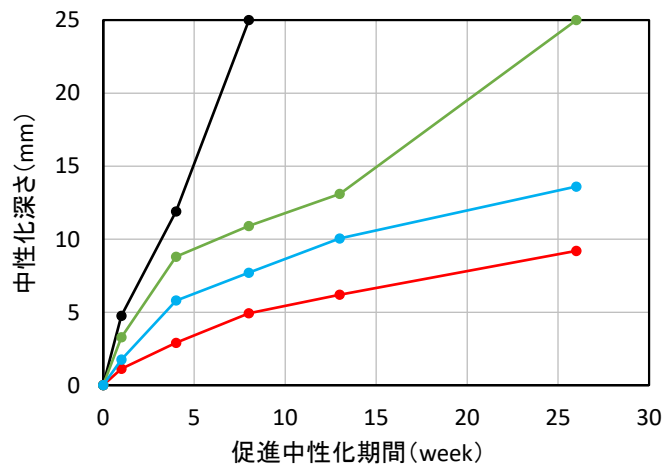
図 3-18 独自法による結合材の種類と中性化深さ



養生方法タイプ A



養生方法タイプ B



養生方法タイプ C

図 3-19 JIS 法による結合材の種類と中性化深さ

(3) 結合材量の混入量の影響

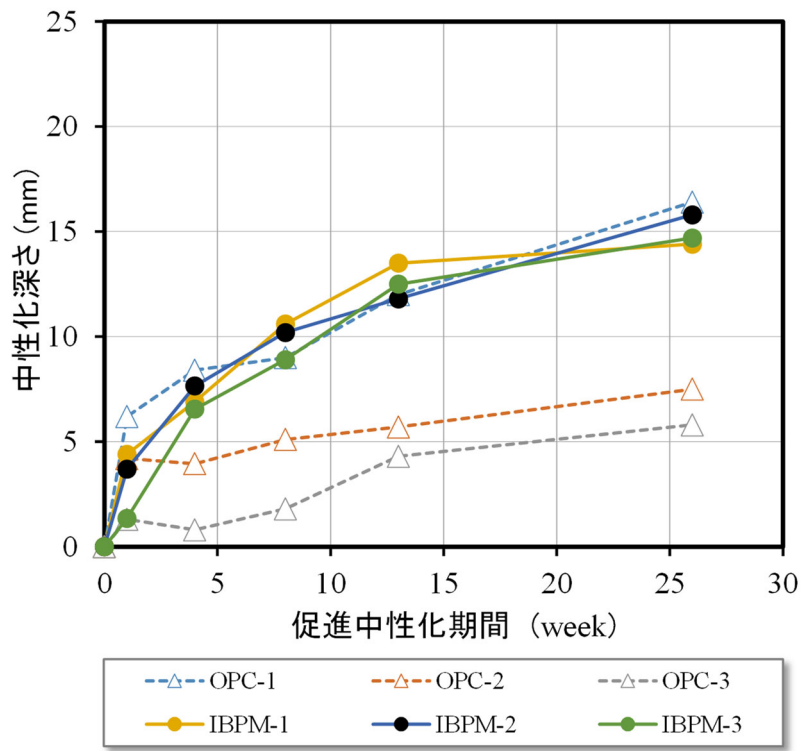
これまでの促進中性化試験において、モルタル供試体の養生方法の違いが促進中性化試験結果に殆ど反映されず、養生方法が中性化深さに及ぼす影響には効果が少ないことを確認した。このことを踏まえて、今回の促進中性化試験では表 3-8 のモルタル配合と表 6-9 に示す 2 種類の養生方法に絞り込んで評価することとした。更に、試験終了までに 26 週間（182 日）は、JIS 法と独自法に区分して促進中性化試験に供することを計画した。なお、供試体は 5 種類とし、IBPM は単位結合材量を 500kg/m^3 、 650kg/m^3 、 800kg/m^3 の 3 種類（各配合における水酸化カルシウム量は 20kg/m^3 、 26kg/m^3 、 32kg/m^3 に相当すると共に、IBPM の強度アップによる中性化抑制効果を期待する）とし、単位セメント量 300kg/m^3 （W/C55%、圧縮強度 $\sigma_{28}=30\text{N/mm}^2$ 程度）の OPC と BB を比較対象とする。

表 3-8 モルタル供試体の配合

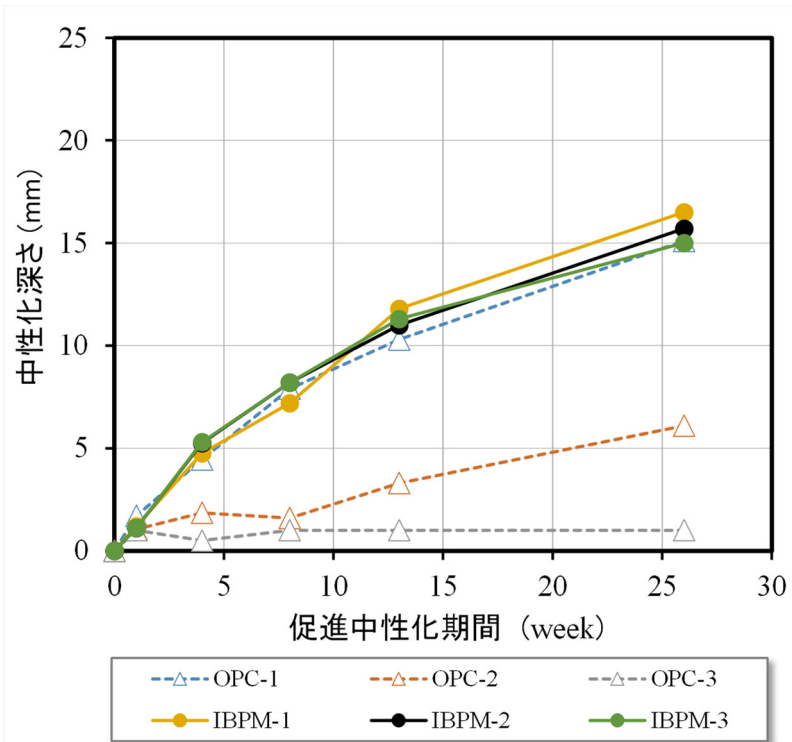
種別	W/B	W	B	S	G	Sp
IBPM-1	22	110	500	797	993	11.00
IBPM-2	22	143	650	690	859	14.30
IBPM-3	22	176	800	582	725	14.40
OPC-1	55	165	300	848	1057	1.80
OPC-2	45	180	400	793	988	2.40
OPC-3	35	175	500	761	948	3.00

表 3-9 促進中性化試験の養生条件

タイプ	養生条件	評価方法
A	蒸気養生後、材齢 28 日まで気中養生	JIS 法
		独自法
B	蒸気養生後、材齢 28 日まで水中養生	JIS 法
		独自法

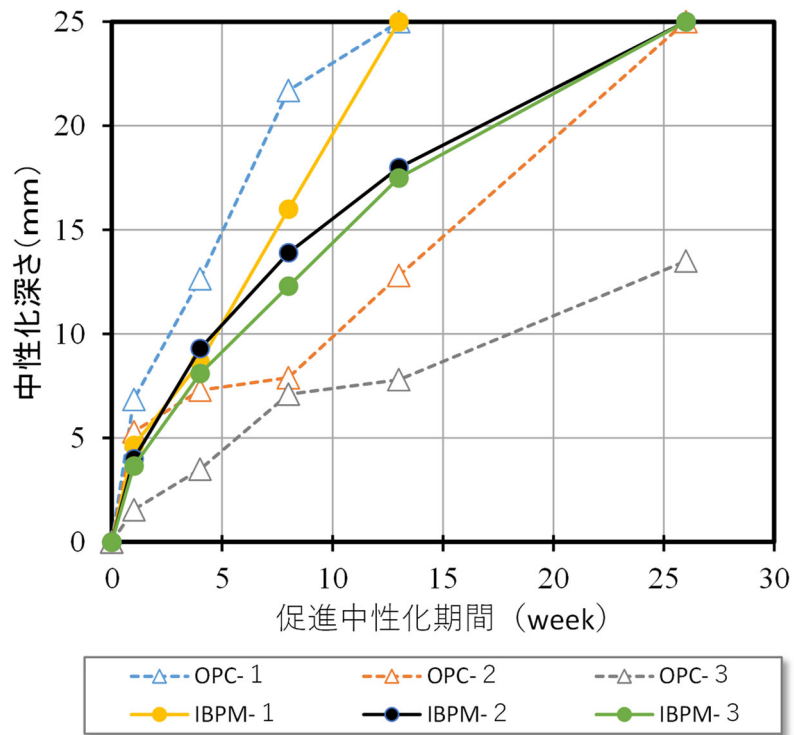


養生タイプ A

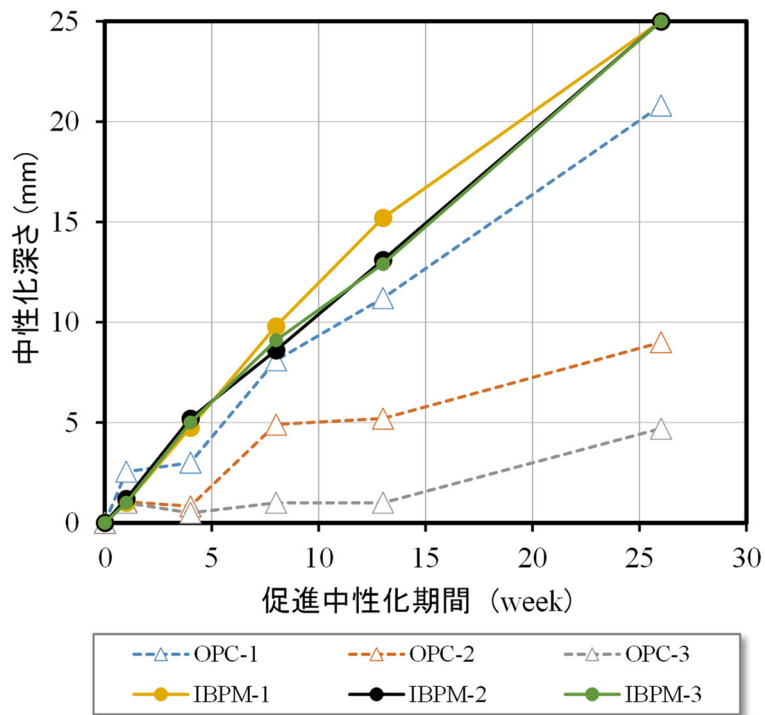


養生タイプ B

図 3-20 独自法による結合材量と中性化深さ



養生タイプ A



養生タイプ B

図 3-21 JIS 法による結合材量と中性深さ

(4) 水酸化カルシウムの効果

これまでの促進中性化試験において、モルタル供試体の養生方法の違いが促進中性化試験結果に殆ど反映されず、養生方法が中性化深さに及ぼす影響には効果が少ないことを確認した。このことを踏まえて、今回の促進中性化試験では表 3-9 に示す 2 種類の養生方法に絞り込んで評価することとした。更に、試験終了までに 26 週間（182 日）は、JIS 法と独自法に区分して促進中性化試験に供することを計画した。なお、供試体は 5 種類とし、IBPM は単位結合材量を 500kg/m^3 、 650kg/m^3 、 800kg/m^3 の 3 種類（各配合における水酸化カルシウム量は 20kg/m^3 、 26kg/m^3 、 32kg/m^3 に相当すると共に、IBPM の強度アップによる中性化抑制効果を期待する）とし、単位セメント量 300kg/m^3 （W/C55%、圧縮強度 $\sigma 28 = 30\text{N/mm}^2$ 程度）の OPC と BB を比較対象とする。

表 3-10 モルタル供試体の配合

種別	W/B	W	B	CH	S	G	Sp
IBPM 40	30	156	500	20	817	832	4.16
IBPM 80	30	168	500	60	777	792	4.48

表 3-11 水酸化カルシウム（CH）の混入量と養生条件

CH添加量	記号	養生条件
40 kg/m^3	40 A	蒸気養生後、水中養生14日まで、気中養生28日まで
	40 B	蒸気養生後、水中養生28日まで
	40 C	封かん養生後材齢3日で脱型、水中養生28日まで
80 kg/m^3	80 A	蒸気養生後、水中養生14日まで、気中養生28日まで
	80 B	蒸気養生後、水中養生28日まで
	80 C	封かん養生後材齢3日で脱型、水中養生28日まで

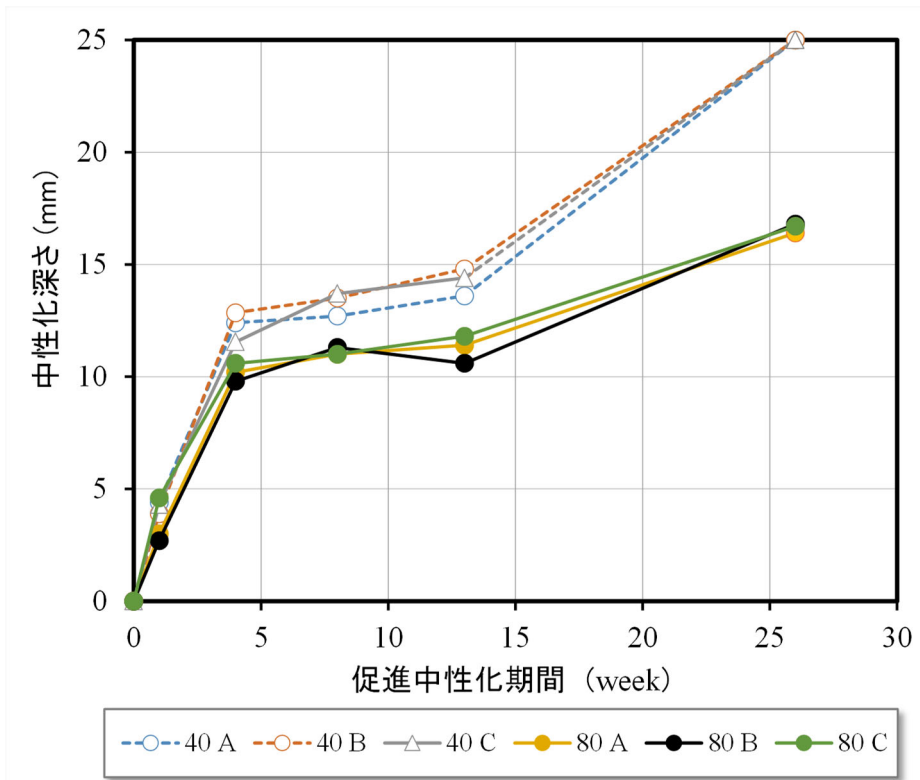


図 3-22 水酸化カルシウム (CH) の混入量と中性化深さ

3.5.2 曝露試験

モルタル製の円柱供試体（直径 100mm×高さ 200mm）を屋外に曝露し、2ヶ月、6ヶ月、10ヶ月、12ヶ月、18ヶ月経過時に供試体を輪切り状態に切断して、中性化深さを測定した。その結果を図 3-23 に示すように、OPC 供試体に比べると、IBPM 供試体の中性化深さは 5 倍程度の大きさで進行している。

また、曝露期間が 18 ヶ月時における中性化深さを水結合材比（W/B）との関係で表したものが図 3-24 である。既往の知見と同様、W/B が大きくなるとこれに伴って中性化深さも大きくなっており、IBPM と OPC ではその傾きが大きく異なっている。前述したように、高強度化を図った IBPM の W/B は 20%～30%程度の領域にあるため、中性化深さの回帰式を使って W/B20%における IBPM の中性化深さを求めると 5.57mm となる。

表 3-12 モルタル供試体の配合

種別	W/B	W	B	S	G	Sp
IBPM	30	150	500	686	1006	5.10
	40	150	375	737	1081	3.69
	50	150	300	768	1126	2.84
	60	150	250	789	1157	2.25
	70	150	214	804	1178	1.84
OPC	30	150	500	722	1058	4.00
	40	150	375	764	1121	3.00
	50	150	300	790	1158	2.40
	60	150	250	807	1183	2.00
	70	150	214	819	1201	1.71

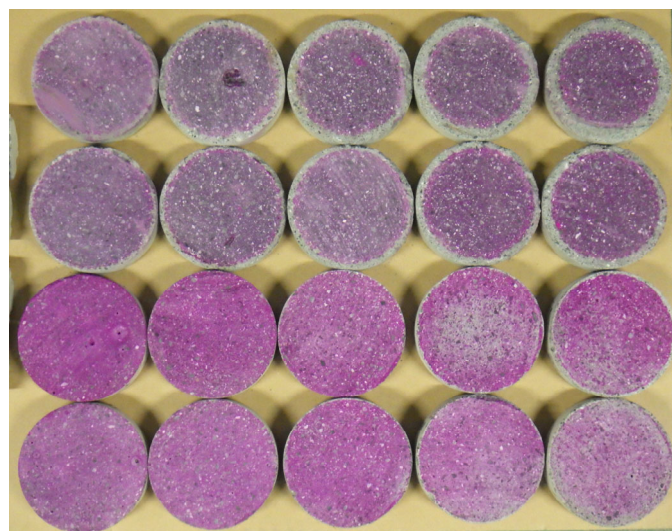
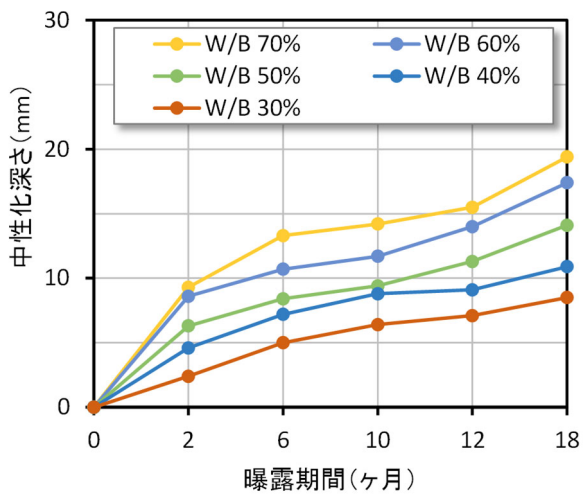
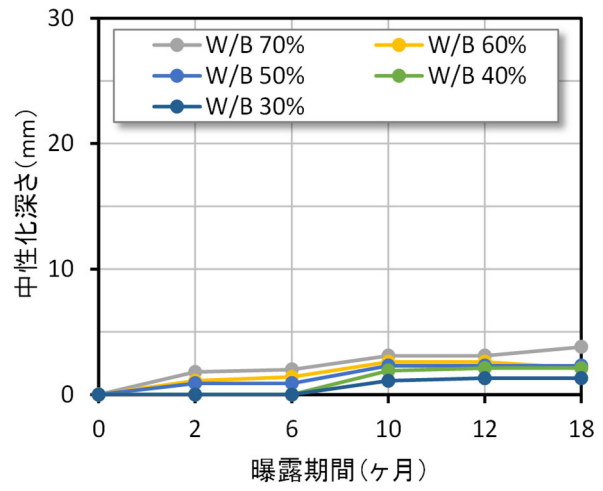


写真 3-4 円柱供試体の中性化深さ測定状況
（上段 2 列：IBPM 下段 2 列：OPC）

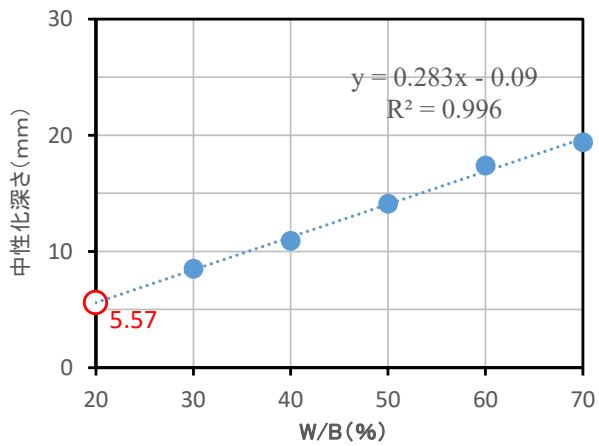


IBPM コンクリート

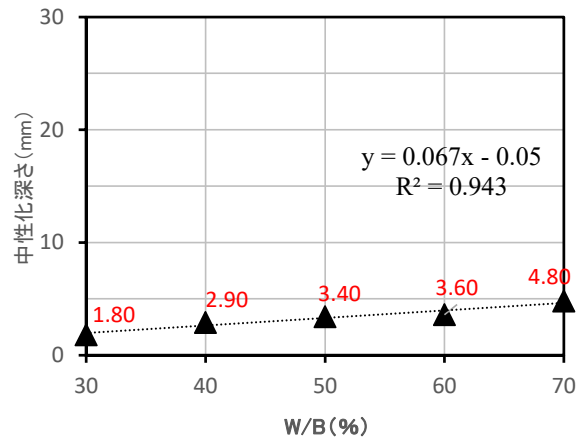


OPC コンクリート

図 6-23 曝露期間と中性化深さの関係



IBPM コンクリート



OPC コンクリート

図 6-24 W/B と中性化深さの関係

3.5.3 レディーミクストコンクリートとの比較（曝露試験）

IBPMコンクリートとレディーミクストコンクリート（生コン：呼び強度 29）を用いて、各々の配合で図 3-25 に示す曝露用大型供試体を作製した。当該供試体から定期的にコア供試体を採取し、中性化深さを計測した結果を図 3-26 に示す。曝露期間が 10 カ月程度までは、両者の中性化深さは概ね同等であったが、それ以降は徐々に差が開き始め、曝露期間が 18 カ月で 4mm の差が生じており、IBPM コンクリートの方が大きい。

表 3-13 曝露試験に用いたコンクリートの配合表

種別	Gmax (mm)	SL (cm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
						W	B	S	G	Sp
IBPMコンクリート	20	8 ± 2	2 ± 1.5	28.0	41.0	140	500	697	1021	5.00
レディーミクストコンクリート	20	8 ± 2	5 ± 1.5	55.7	46.1	165	297	841	998	4.16

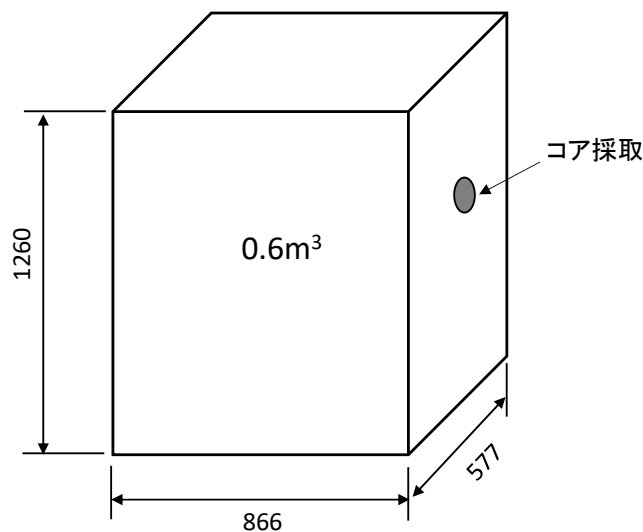


図 3-25 曝露用大型供試体（単位：mm）

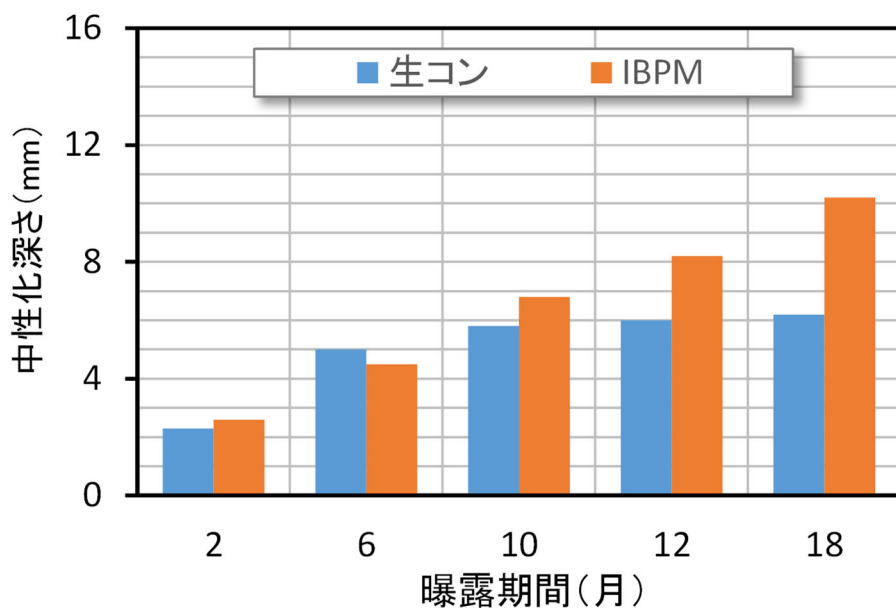


図 6-26 曝露期間と中性化深さ

3.5.4 100年後の中性化深さ

促進中性化試験 (JIS A 1153) で得られた中性化速度係数は、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針 (案)」¹²⁾ に示される換算式により、実環境での速度係数に換算できる。

表 3-14 に示すように、IBPM モルタルの促進中性化試験において、これまでに得られた中性化速度係数の最小値は 19.8mm である。促進中性化試験の中性化速度係数は、実環境では 1/10 に相当するとされる。このことから、実環境における 100 年後の中性化深さを求めると 19.8mm となり、中性化残り 20mm 以下を満足するため、IBPM コンクリートにおいても 100 年間は鉄筋に腐食が発生しないことが推察される。

表 3-14 100 年後の中性化深さの予測

促進中性化試験	温度 (°C)	20
	湿度 (%)	60
	CO ₂ 濃度 (%)	5
	試験開始材齢 (日)	28
	試験期間 (週)	26
IBPM モルタルの試験結果 (独自法より)	中性化深さ (mm)	14.0
	中性化速度係数 (mm/√年)	19.8
実環境の中性化速度係数 (mm/√年)		1.98
中性化残り (mm) ※		20.0
100 年後の中性化深さ (mm)		19.8

※中性化残り = かぶり厚 30mm - 鉄筋の腐食開始位置 10mm

3. 6 凍結融解抵抗性試験

PCa 製品は使用環境条件によっては、凍結融解繰り返しの作用を受けることがあることを考慮し、IBPM コンクリートの凍結融解抵抗性について評価を行った。表 2—26 に示した No.21 (W/B=21.1%) の配合の IBPM コンクリートにより供試体を作製し、JIS A 1148 (A 法) による凍結融解試験を行った。

試験に用いた IBPM コンクリートの配合と諸性状は表 3—15 に示すとおりである。供試体は、コンクリート打設後に蒸気養生を行い、材齢 1 日で脱型後、材齢 21 日まで気中養生を行い、その後材齢 28 日目まで 7 日間の水中養生を行ってから凍結融解試験に供した。

図 3—27 および図 3—28 は、凍結融解繰り返しに伴う相対動弾性係数および供試体質量の変化をそれぞれ示したものであり、表 3—16 には凍結融解試験結果を示した。IBPM コンクリートは、圧縮強度が 60N/mm^2 程度と高い場合であっても、空気量 1.6% の場合 (配合 A) は、60 サイクル以降から相対動弾性係数が急激に低下したため 150 サイクルで試験を中止した。既往の研究^{13) 14)}においても、FA や BFS を用いアルカリ刺激材として水酸化カルシウムを用いたコンクリートは、空気量を 2% 程度とした場合では十分な耐凍結融解性を有していないことが示されている。

一方、AE 剤を添加して空気量 5.1% とした場合 (配合 B) は、300 サイクルにおける相対動弾性係数は 97% であった。また、供試体の質量変化率はサイクル数の進行に伴って徐々に増加し、スケーリングやポップアウトの発生によって、300 サイクルで 1.8% までに達した。この場合、IBPM コンクリートには FA を多量に使用しているために、FA の不燃炭素に AE 剤が吸着する可能性が高いことから、空気量を確保するために必要な AE 剤の添加量が、通常の数 100 倍と極めて大きくなったことが影響しているものと考えられる。また、表 6—14 に示すとおり圧縮強度が著しく小さくなっており、過大な AE 剤添加量により硬化が阻害された可能性が推察される。これらの結果から、IBPM コンクリートの凍結融解抵抗性を確保するために、通常の AE 剤により空気量を増加させることは有効ではないものと考えられる。

岡田らは、特殊混和剤 (パラフィン系エマルジョン) を混和した空気量 3.2% のコンクリートは、空気量を 5.0% 確保した AE コンクリートと同等以上の凍結融解抵抗性を有していることを報告している¹⁵⁾。そこで、IBPM コンクリートの凍結融解抵抗性を改善するために、この特殊混和剤 (パラフィン系エマルジョン) に着目した。図 3—25 および図 3—26 に示すとおり、AE 剤を使用せずに、特殊混和剤 (P) を 18.0kg/m^3 混入した配合 C (空気量 1.9%、気泡間隔係数 $202\mu\text{m}$) は、300 サイクルにおける相対動弾性係数の減少はほとんど生じておらず、質量変化率も僅かであり、高い凍結融解抵抗性が認められた。なお、表 3—14 に示したように、特殊混和剤混入の有無 (配合 A と配合 C) による圧縮強度の差は認められず、流動性を確保するために Sp の添加量が若干増加した程度であった。

本研究で使用した特殊混和剤 (P) によって凍結融解抵抗性が向上した理由としては、供試体への水分浸透が抑制されたことや、エマルジョン中に存在するパラフィン粒子の凝集体が、エントレインドエアと同等の働きをすることが報告されており¹⁵⁾、IBPM コンクリートの場合も同様なメカニズムによって、凍結時の膨張圧を緩和したことが有効であったものと考えられる。

以上の結果から、パラフィン系エマルジョンの特殊混和材を用いることによって IBPM コンクリートの耐凍結融解性が著しく改善されることが明らかとなった。

表 3-15 凍結融解試験に用いた IBPM コンクリートの配合と諸性状

配合	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							SLF (cm)	Air (%)	材齢14日 圧縮強度 (N/mm ²)
			W	IBPM	S	G	P	Sp (B×%)	AE剤 (B×%)			
A	21.1	45	116	550	770	959	0	1.9	0	48.0	1.6	59.9
B							0	3.5	4.2	51.0	5.1	38.8
C							18.0	2.5	0	54.0	1.9	60.4

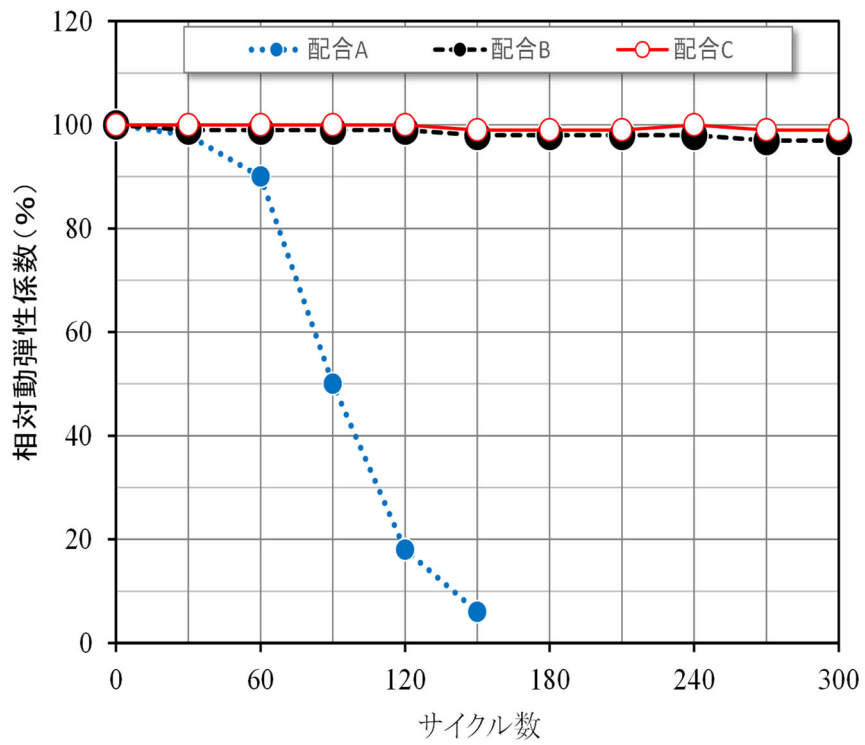


図 3-27 凍結融解サイクルと相対動弾性係数

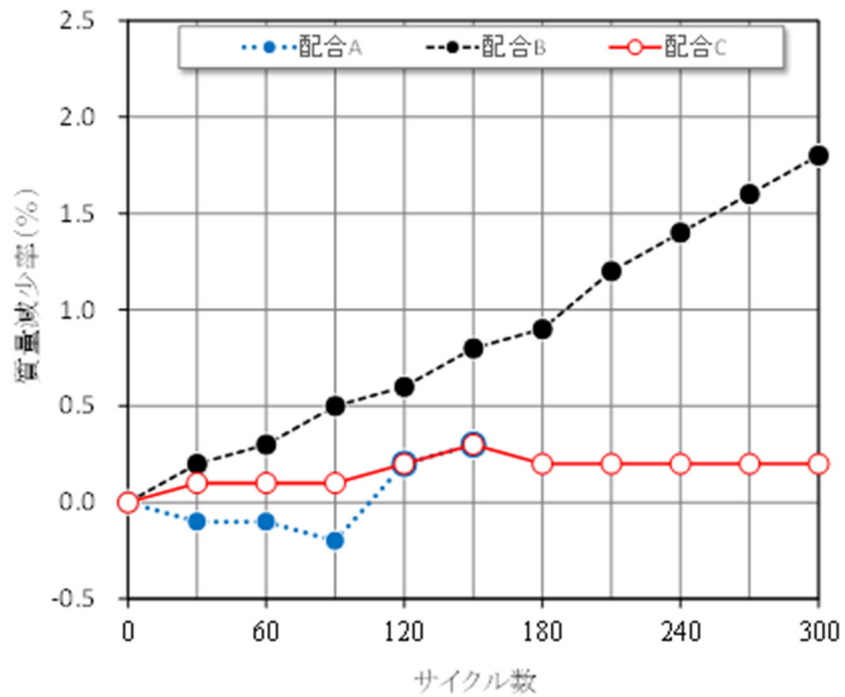


図 3-28 凍結融解サイクルと質量変化率

表 3-16 凍結融解試験結果

配合	A (プレーン)	B (AE 剤)	C (特殊混和材 P)
サイクル数	150	300	300
一次共鳴振動数 (Hz)	2333 → 508	2162 → 2103	2336 → 2323
相対動弾性係数 (%)	6	97	99
耐久性指数 (%)	16	97	99
質量減少率 (%)	0.3	1.8	0.2
供試体の外観性状	スケーリング	スケーリング ポップアウト	変状なし

3. 7 すり減り抵抗性

PCa 製品が水路構造物に使用されることを考慮し IBPM コンクリートの耐摩耗性について評価を行った。長束らは、水路のような流水環境下のコンクリート構造物の耐摩耗性を評価することを目的とし水砂噴流磨耗試験装置¹⁶⁾を提案している。当該装置は、砂を含む水の噴流によるすり磨きおよび衝撃により、コンクリート中のモルタルが選択的に切削される摩耗現象を再現でき、比較的短時間で流水環境下の耐摩耗性を評価できることが報告されている。本研究では、この水砂噴流磨耗試験装置を用いて、モルタル供試体（縦 195×横 145×厚さ 38mm）で耐摩耗性を評価した。試験では、4 号珪砂（0.30～1.18mm）から 0.6mm 以下を除去した珪砂を水と混合し、噴射口から供試体表面まで 130mm の高さから 2MPa の高圧（水量約 890/min）で、計 10 時間噴射した。摩耗深さは、レーザー変位計を用いて供試体の短辺方向に 6 測線読み取り、平均摩耗深さで表示した。

摩耗試験に用いた供試体は表 2-29 に示した No.21 配合（ボックスカルバート）の IBPM コンクリートからウェットスクリーニングによってモルタルを採取して作製した。また、比較のため OPC コンクリート（W/B=38%，s/a=45%，W=160kg/m³，B=420 kg/m³，S=810 kg/m³，G=1009 kg/m³，Sp=4.20 kg/m³）についても同様に供試体を作製した。モルタル供試体は蒸気養生を行った後、材齢 28 日まで気中養生を行って摩耗試験を行った。図 3-27 は摩耗試験結果を示している。IBPM モルタルの摩耗深さは、W の大幅な低減や低 W/B 化によって OPC モルタルより若干小さくなっている。このことから、水路等の流水環境下の構造物への利用を想定した場合、IBPM コンクリートはコンクリートと同等以上の耐摩耗性を有しているものと考えられる。

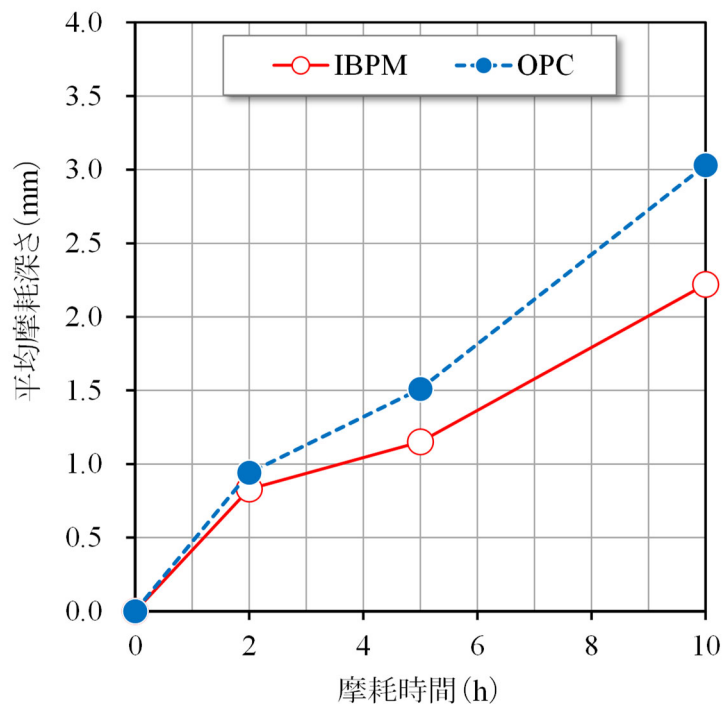


図 3-29 水砂噴流による摩耗深さ

3. 8 電子顕微鏡による水和組成観察

IBPM と OPC のペースト試料を使って、材齢に伴う水和組成（空隙や水和の進行具合）の変化に着目して反射電子像¹⁷⁾による観察を行った。対象とした材齢は 14 日と 91 日とした。使用装置と観察条件を表 3-17 に示す。反射電子像の観察時には、水和組織の粗密を色調の変化として捉えられるよう、カーボンテープとアルミテープを試料ホルダに貼付け、これらの輝度が常に一定の値となるように、コントラストブライトネスを調整した。

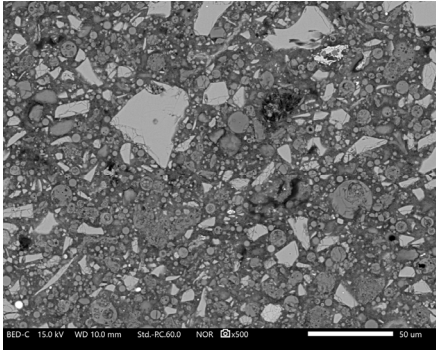
写真 3-5 の反射電子像において、空隙（黒く表示されている部分）が占める割合を同一材齢で比較すると、IBPM よりも OPC の方が多いことが顕著である。また、経時変化に着目すると、OPC では材齢 14 日と 91 日で水和組織に変化は見られなかったが、IBPM では FA や BFS の粒子間を充填している水和物の色調が、材齢の進行に伴って明るくなっていることが確認された。この反射電子像の明るさは化学組成や密度を反映していることから、これらが変化しているものと考えられる。

以上のことから、IBPM は OPC に比べて空隙が少なく、緻密な組織であることが確認された。また、材齢の進行に伴う水和組織の変化は OPC では認められなかったが、IBPM は水和物の定量値が経時と共に高くなっていることが確認された。

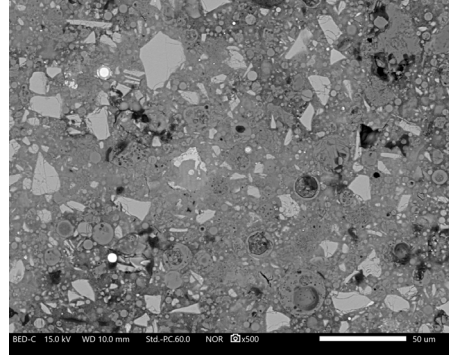
IBPM は単位容積当たりの粉体の空間率が低く、充填性の良い粉体構造となっていることが、蒸気養生直後から優れた強度発現性を示す一因であると考えられる。なお、IBPM は長期材齢での強度増進が確認されている。これは、本水和組織観察において、IBPM 中の水和物の密度が増加していることが示されたことや、材齢 91 日において IBPM 中の FA が反応していることが確認されたことから、FA のポゾラン反応が寄与しているものと考えられる。

表 3-17 使用装置

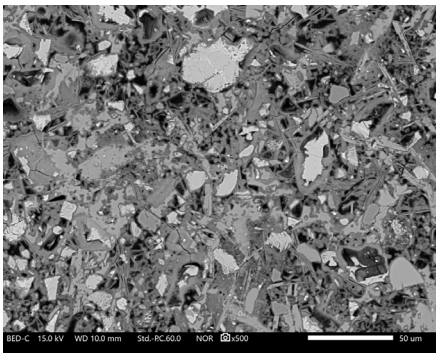
SEM	IT-300HR（日本電子社製）
加速電圧	15 kV
観察像	反射電子像（BEI）
観察範囲	256×192 μm の大きさとし、各試料とも 5 視野



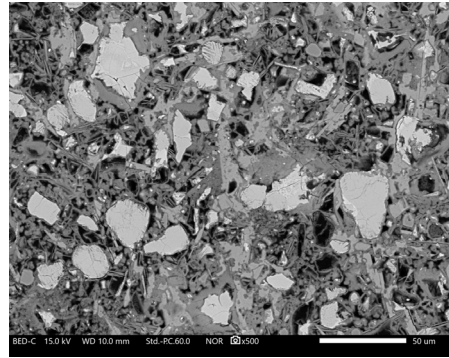
IBPM 材齡 14 日



IBPM 材齡 91 日



OPC 材齡 14 日



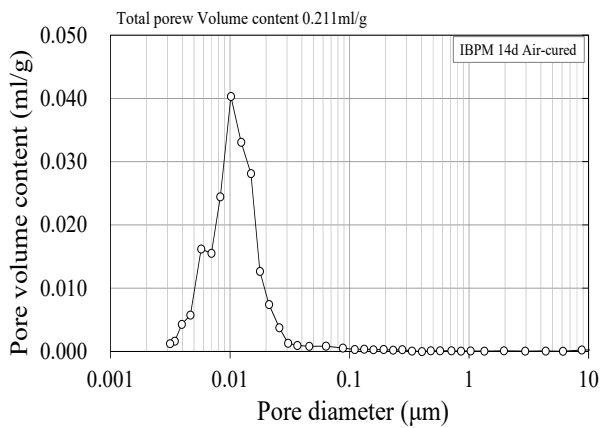
OPC 材齡 91 日

写真 3-5 電子顕微鏡による水和組成観察 (反射電子像 : 50 μm)

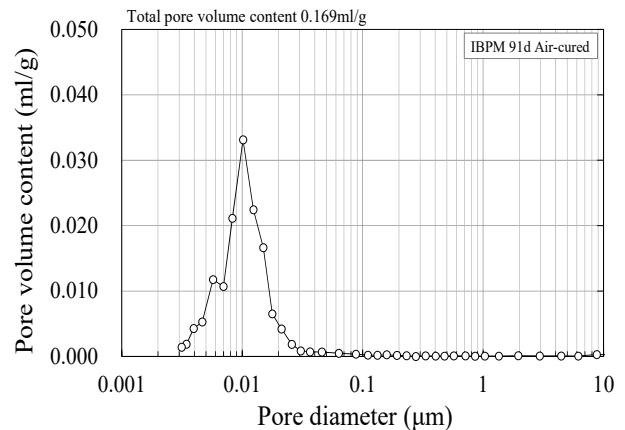
3. 9 細孔径分布

コンクリートの強度や耐久性は空隙との密接な関係があるため、前述した水和生成物の同定に用いたペースト供試体を対象に、水銀圧入式ポロシメーターによる細孔径分布の測定を行った。ここでは、測定結果の中から材齢 14 日と材齢 91 日における IBPM と OPC の気中養生に着目して、図 3-30 と表 3-18 に示した。

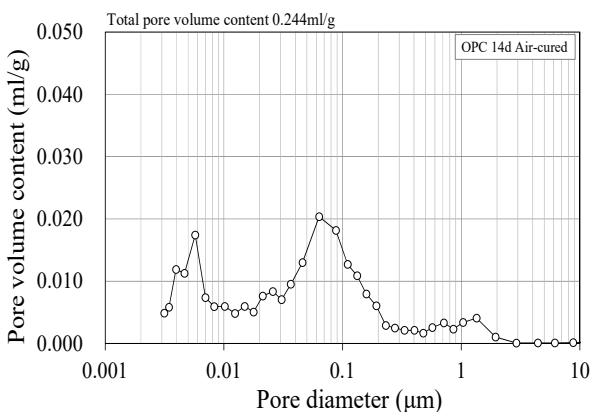
表 3-18 に示した細孔径に関する測定結果一覧を見ると、IBPM の空隙率（細孔率）は材齢の経過に伴って僅かに低くなる傾向であったが、メディアン細孔直径（比表面積基準）は双方の材齢とも同程度であった。また、図 3-30 から、IBPM は細孔径分布の幅が狭く、 $0.03 \mu\text{m}$ 以下の小径側に集中する傾向が見られることから、OPC よりも緻密性が高いことが顕著に表れている。既往の研究¹⁸⁾では、BFS と FA を併用した場合は全空隙量が大幅に減少し、 $0.02 \mu\text{m}$ 以下の微細な空隙の割合が増加したことが確認されており、本研究結果と類似している。これに対して、OPC の細孔率は材齢 14 日と材齢 91 日で同程度であり、メディアン細孔直径（比表面積基準）は材齢の経過に伴った変化は少なかった。



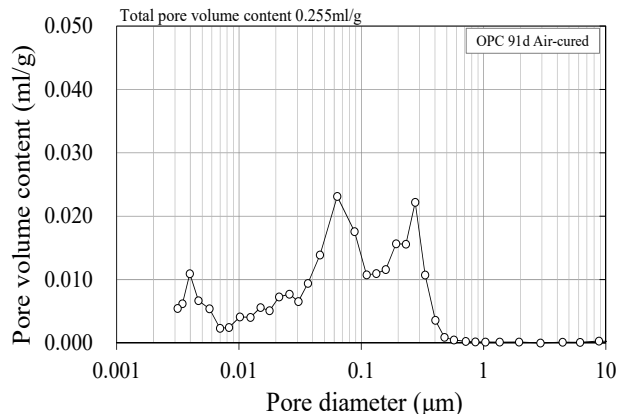
IBPM ペースト（材齢 14 日）



IBPM ペースト（材齢 91 日）



OPC ペースト（材齢 14 日）



OPC ペースト（材齢 91 日）

図 3-30 細孔径分布（IBPM と OPC の比較）

表 3-18 細孔径分布の詳細

材齢 (日)	項目 (単位)		気中養生	
			IBPM	OPC
14	全細孔容積	(ml/g)	0.211	0.244
	全細孔比表面積	(m ² /g)	84.1	69.8
	メディアン細孔直径 (容積基準)	(μm)	0.0111	0.0428
	メディアン細孔直径 (比表面積基準)	(μm)	0.0087	0.005
	平均細孔直径	(μm)	0.0100	0.0140
	細孔率	(%)	33.0	36.3
91	全細孔容積	(ml/g)	0.169	0.255
	全細孔比表面積	(m ² /g)	65.0	52.8
	メディアン細孔直径 (容積基準)	(μm)	0.0109	0.0770
	メディアン細孔直径 (比表面積基準)	(μm)	0.0083	0.0044
	平均細孔直径	(μm)	0.0104	0.0193
	細孔率	(%)	27.3	37.1

3. 10 アルカリ骨材反応試験

本アルカリ骨材反応試験は、「無害でない骨材（安山岩）」を使って、意図的にアルカリシリカ骨材反応（以下 ASR と称する）による膨張が発生し易い条件を設定した。これは、IBPM (e-CCN) の ASR 制効果を検証することが目的である。

本試験に使用した骨材は、「JIS A 1145 : 2017 骨材の ASR 反応性試験方法（化学法）」によって「無害でない」ことを確認した。なお、溶解シリカ量 (Sc) は、質量法による。試験結果および判定結果を表 3-19 に示す。

表 3-19 アルカリシリカ反応性試験結果および判定結果

試料名	溶解シリカ量(Sc)		アルカリ濃度減少量(Rc)		判定結果
	[mmol/L]		[mmol/L]		
骨材（安山岩）	572		114		無害でない
	573	573	113	113	
	574		113		

3. 10. 1 骨材のアルカリシリカ反応性の判定

骨材のアルカリシリカ反応性の判定は、測定項目における定量値の平均値を用いて行うものとし、次による。

- 溶解シリカ量 (Sc) が 10mmol/L 以上で、アルカリ濃度減少量 (Rc) が 700mmol/L 未満の範囲では、溶解シリカ量 (Sc) がアルカリ濃度減少量 (Rc) 未満となる場合、その骨材を「無害」と判定し、溶解シリカ量 (Sc) がアルカリ濃度減少量 (Rc) 以上となる場合、その骨材を「無害でない」と判定する。
- 溶解シリカ量 (Sc) が 10mmol/L 未満で、アルカリ濃度減少量 (Rc) が 700mmol/L 未満の場合、その骨材を「無害」と判定する。
- アルカリ濃度減少量 (Rc) が 700mmol/L 以上の場合は判定しない。

(1) 試験概要

本試験は「無害でない」骨材を使って、IBPM を用いたモルタルと OPC を用いたモルタルの ASR 反応の抑制効果を検証するものである。

(2) 試験項目

試験項目および試験対象試料を表 3-20 に示す。

表 3-20 試験項目および試験対象試料

試験項目	数量	試験対象試料
化学法 (JIS A 1145)	1 試料	骨材 (安山岩)
促進膨張試験 (モルタルバー法)	3 試料 (水準)	OPC IBPM+N-EX IBPM
実体・偏光顕微鏡観察	3 試料	モルタル (OPC, IBPM+N-EX, IBPM)

(3) 試験方法

①化学法 (JIS A 1145)

促進膨張試験に用いる ASR 反応性の骨材について化学法を実施した。化学法は「JIS A 1145:2017 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法 (化学法)」に準拠して実施し、溶解シリカ量 (Sc) には質量法を用いた。

②促進膨張試験 (モルタルバー法)

モルタル作製に用いた材料, モルタルの配合表および供試体の作成方法を表 3-21~表 3-23 に示す。促進膨張試験 (モルタルバー法) のアルカリ量や促進養生, 判定などの条件は, JIS A 1146 に準拠して実施した。ただし, 「IBPM+N-EX」と「IBPM」のアルカリ量を除く, 配合と練混ぜ, 初期養生 (図 3-29 に示す) については, それぞれの通常の仕様により作製した。「OPC」の初期養生についても他の試料と統一し, 図 3-31 の方法で行った。

表 3-21 使用材料

使用材料	記号	備考
水	W	水道水
1mol/L NaOH 溶液	NaOH	弊社購入品
減水剤	SP	依頼者提供品
セメント	B	OPC アルカリシリカ反応性試験用普通 ポルトランドセメント (弊社購入品)
IBPM		IBPM 依頼者提供品
膨張材		N-EX 依頼者提供品
細骨材	S	砕砂 (弊社購入品：小樽産安山岩)

表 3-22 モルタルの配合表

試料名	W/B(%)	W	NaOH(cc)	SP	OPC	IBPM	N-EX	S
OPC	50	170	130	0	600	0	0	1350
IBPM+N-EX	21	23	142	17.33	0	819	47	1213
IBPM	21	18	143	21.70	0	866	0	1210

表 3-23 モルタル供試体の作製方法

試料名	練混ぜ方法	供試体作製	初期養生方法
OPC	JIS A 1146 に準拠		図 1 に示す方法で蒸気養生を行った。
IBPM+N-EX	B+S 低速 30 秒攪拌→	JIS A 1146 に準拠	
IBPM	W+NaOH+SP 6 分混合→排出	JIS A 1146 に準拠	

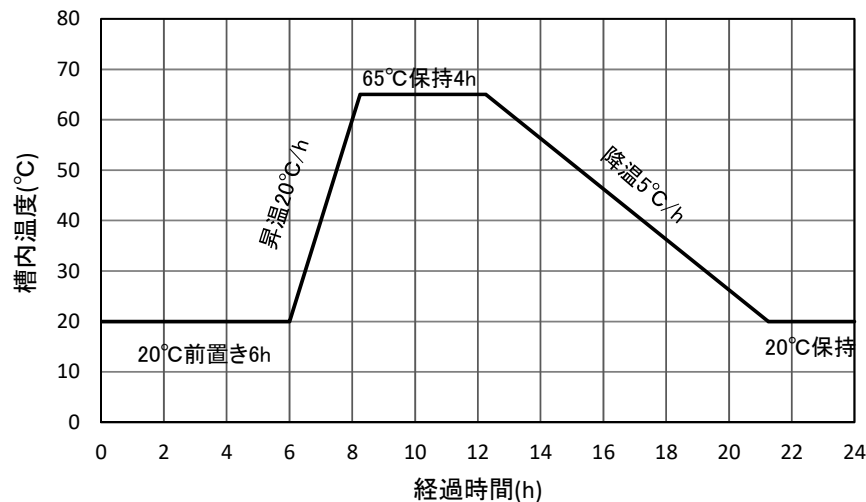


図 3-31 蒸気養生条件

③実体顕微鏡観察

26週の材齢を終了した試験体について、モルタル長手方向における中央付近の切断面(角40×40mm)において、ASRの発生状態について実体顕微鏡下で観察を行った。

④偏光顕微鏡観察

実体顕微鏡観察後の切断面を研磨し、鏡面研磨薄片を作製した。作製した鏡面研磨薄片を偏光顕微鏡下で観察し、ASRの進行状況および、その他特徴的な点について示した。

通常、ASRは以下の順序で進行する(Katayama et al., 2004, 2008, Katayama, 2012)ため、これらの点について示した^{19)~23)}。

- i) 骨材の反応リムの形成
- ii) 骨材周辺のゾル・ゲルの取り巻き
- iii) 骨材内のひび割れ形成・ゲル充填
- iv) 骨材を取り巻くセメントペーストへのひび割れ進展・ゲル充填
- v) 骨材から離れたセメントペーストの気泡内へのゲルの頻繁な沈殿

次に、上記の偏光顕微鏡観察に基づき、劣化進行度を3段階(軽微・中程度・顕著)で推定した(Katayama et al., 2008)。骨材に初期の反応(反応リム・ゲルの取り巻き)のみが主に認められる場合には、軽微(潜伏期)と判定する。ひび割れが多数の骨材内に生じたものや、骨材からセメントペーストに向かって進展し、コンクリート(モルタル)に劣化が生じたことを意味する場合は、中程度(進展期・加速期)とみなす。さらに反応が進行し、セメントペースト内に密集したひび割れの形成や、そのひび割れに沿った気泡内へのゲルの沈殿が頻繁に見られる場合は、顕著(加速期・劣化期)と考える。

(4) 試験結果

①化学法 (JIS A 1145)

試験結果を表 3-24 に示す。試験の結果、Sc=573 mmol/L、Rc=113 mmol/L で、「無害でない」と判定された。

表 3-24 アルカリシリカ反応性試験結果および判定結果

試料名	溶解シリカ量 (Sc) [mmol/L]		アルカリ濃度減少量 (Rc) [mmol/L]		判定結果
骨材 (安山岩)	572	573	114	113	無害でない
	573				
	574				

※ 骨材のアルカリシリカ反応性の判定

骨材のアルカリシリカ反応性の判定は、測定項目における定量値の平均値を用いて行うものとし、次による。

- a) 溶解シリカ量 (Sc) が 10mmol/L 以上で、アルカリ濃度減少量 (Rc) が 700mmol/L 未満の範囲では、溶解シリカ量 (Sc) がアルカリ濃度減少量 (Rc) 未満となる場合、その骨材を「無害」と判定し、溶解シリカ量 (Sc) がアルカリ濃度減少量 (Rc) 以上となる場合、その骨材を「無害でない」と判定する。
- b) 溶解シリカ量 (Sc) が 10mmol/L 未満で、アルカリ濃度減少量 (Rc) が 700mmol/L 未満の場合、その骨材を「無害」と判定する。
- c) アルカリ濃度減少量 (Rc) が 700mmol/L 以上の場合は判定しない。

②促進膨張試験（モルタルバー法）

モルタルバー法の試験結果を表 3-25 および図 3-32 に示し、促進膨張試験後におけるモルタル供試体の状態を写真 3-6 に示す。

「OPC」は、材令 2 週目で 0.2% を超え、13 週以降では 0.7% 程度で膨張量は収束した。一方、「IBPM+N-EX」と「IBPM」では、膨張は殆ど生じなかった。判定の結果、「OPC」は「無害でない」、「IBPM+N-EX」と「IBPM」は「無害」であった。

表 3-25 モルタルバー法試験結果

試料名	材齢 試料	膨 張 率 (%)						判定
		基長	2 週	4 週	8 週	13 週	26 週	
OPC	No.1	0.000	0.231	0.566	0.623	0.685	0.688	無害で ない
	No.2	0.000	0.233	0.575	0.652	0.695	0.700	
	No.3	0.000	0.229	0.577	0.653	0.700	0.704	
	平均膨張率	0.000	0.231	0.573	0.643	0.693	0.697	
IBPM+ N-EX	No.1	0.000	0.001	0.004	0.008	0.013	0.018	無害
	No.2	0.000	0.001	0.005	0.009	0.014	0.016	
	No.3	0.000	0.002	0.004	0.009	0.013	0.016	
	平均膨張率	0.000	0.001	0.004	0.009	0.013	0.017	
IBPM	No.1	0.000	-0.006	-0.009	-0.002	0.002	0.004	無害
	No.2	0.000	-0.006	-0.008	-0.002	0.004	0.003	
	No.3	0.000	-0.007	-0.010	-0.003	0.001	0.002	
	平均膨張率	0.000	-0.006	-0.009	-0.002	0.002	0.003	

- ・蒸気養生直後（材令 0 日）において、3 水準ともにモルタル表面に ASR ゲルの滲出、ASR によるひび割れなどは確認されなかった。
- ・「OPC」は、測定材齢 2 週で 3 本共にクラック発生。

*JIS A 1146 の判定基準によれば、3 本の平均膨張率が 26 週後に 0.100%未満の場合は、「無害」とし、0.100%以上の場合は、「無害でない」とする。なお、材齢 13 週で 0.050%以上の膨張を示した場合は、その時点で、「無害でない」としてもよい。その場合、材齢 26 週の測定を省略してもよい。材齢 13 週で 0.050%未満のものは、その時点で、「無害」と判定してはならず、材齢 26 週まで試験を続けた後に判定をしなければならない。

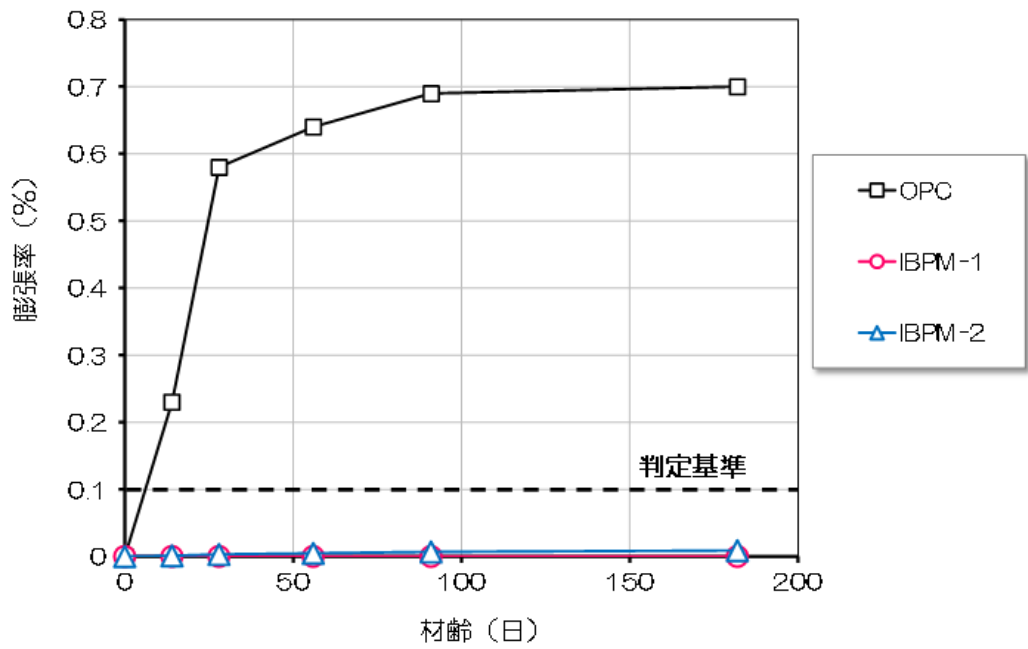


図 3-32 促進膨張試験（モルタルバー法）結果

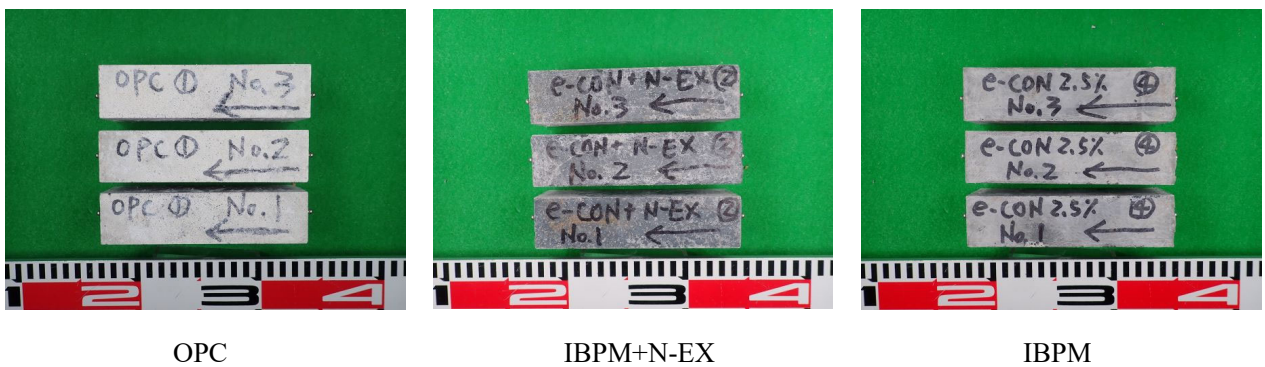


写真 3-6 促進膨張試験後のモルタル供試体写真

3. 10. 2 実体顕微鏡観察

(1) 「OPC」

モルタルの切断面および実体顕微鏡写真を写真3-7（左側）に示す。

切断面において、安山岩に反応リムの形成、ASRゲルの滲出、およびひび割れが認められた。

(2) 「IBPM+N-EX」

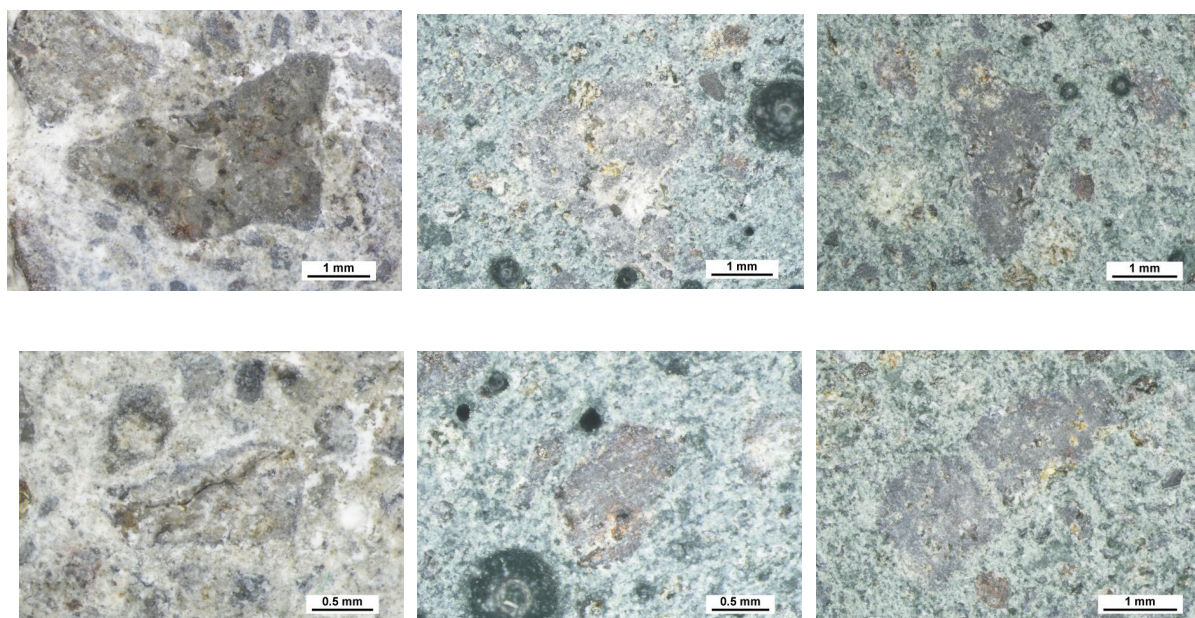
モルタルの切断面および実体顕微鏡写真を写真3-7（中央）に示す。

切断面において、安山岩に反応リムの形成が僅かに認められた。

(3) 「IBPM」

モルタルの切断面および実体顕微鏡写真を写真3-7（右側）に示す。

切断面において、安山岩に反応リムの形成が僅かに認められた。



OPC 断面

- ・ 反応リム
- ・ ASRゲル（白色）の滲出
- ・ ひび割れ

IBPM+N-EX 断面

- ・ 淡い反応リム

IBPM 断面

- ・ 淡い反応リム

写真3-7 モルタル供試体切断面の拡大

3. 10. 3 偏光顕微鏡観察

写真3-7は単ニコルと直交ニコルの対を左右に配置して示した。単ニコル（左の写真）は、普通に透過光で観察したものであり、直交ニコル（右の写真）は同じ視野で、偏光板をさらに差し入れることにより鉱物の種類により異なる複屈折を干渉色（実際の色ではない）として観察したものである。

(1) 「OPC」

偏光顕微鏡下での観察写真を写真3-8に示す。また、ASRの観察結果を表3-26に、ASRを発生した岩石に含まれる鉱物の観察結果を表3-27に示す。

ASRは、安山岩の骨材からセメントペーストへひび割れが進展している状態が認められ、さらに、ひび割れがセメントペースト中にも高密度に生成していた。したがって、ASRの劣化進行度は中程度～顕著（加速期）と判定された。安山岩のASR反応性鉱物はクリストバライトとトリディマイトである。セメントペーストには結合材として、普通ポルトランドセメントが認められた。

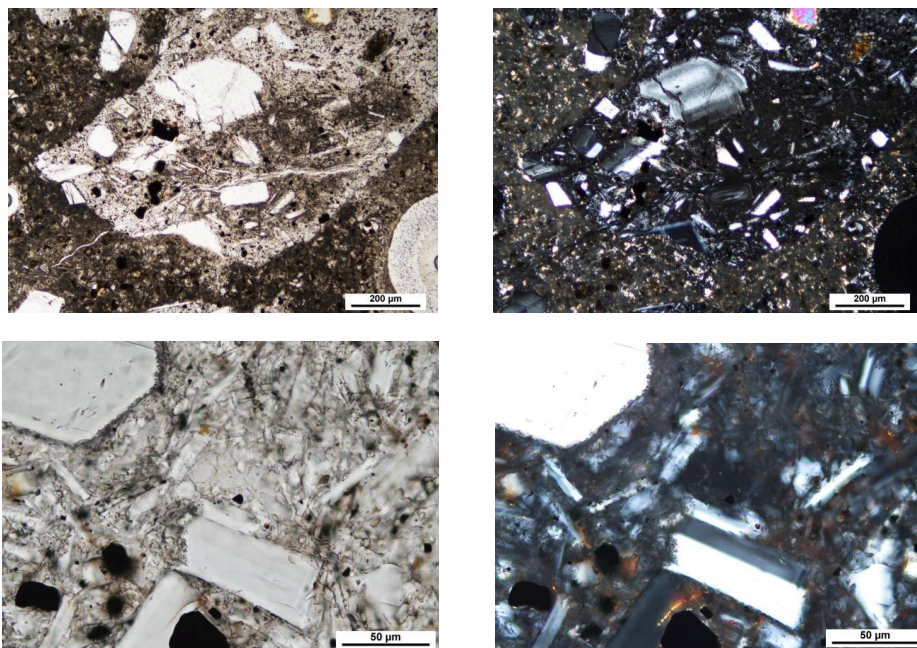


写真3-8 偏光顕微鏡写真（OPC）

OPCの偏光顕微鏡写真より、安山岩に骨材からセメントペーストに進展したASRによるひび割れが認められる。写真の安山岩は斜長石、単斜輝石、斜方輝石の斑晶と、それらの粒間で微細な鉱物から構成される。安山岩の石基には、ASR反応性鉱物のクリストバライトが含まれる。クリストバライトは、単ニコルにおいて屋根瓦状で認められ、直交ニコルで暗く映る。

表 3—26 偏光顕微鏡観察に基づく ASR の進行状況
(Katayama et al., 2008, Katayama 2012 に基づく)

試料名	岩石	ASR 進行段階 →					劣化度 評価
		i	ii	iii	iv	v	
		骨材			セメントペースト		
反応 りム	ゲルの滲み ・取り巻き	ひび割れ ゲル充填	ひび割れ ゲル充填	気泡 ゲル充填			
OPC	安山岩	◎	◎	◎	◎	○	2~3
	総合評価						2~3

顕微鏡観察による評価

ASR の程度 : ◎ 顕著 ; ○ あり ; + 微量 ; 空欄 なし

劣化度の評価 : 1 軽微(潜伏期に相当) ; 2 中程度(進展期・加速期に相当) ;

3 顕著(加速期・劣化期に相当)

表 3—27 ASR を発生した岩石の偏光顕微鏡観察結果

試料名	岩石	主要な構成鉱物 (構成量比の多いものから順に記載)
OPC	安山岩	斜長石, 単斜輝石, 斜方輝石, 不透明鉱物, クリストバライト, トリディマイト

(2) 「IBPM+N-EX」

偏光顕微鏡下での観察写真を写真3-9に示す。また、ASRの観察結果を表3-28に、ASRを発生した岩石に含まれる鉱物の観察結果を表3-29に示す。

偏光顕微鏡観察の結果、安山岩にはASRによるひび割れは確認されなかった。したがって、ASRの劣化進行度は軽微（潜伏期）と判定された。安山岩のASR反応性鉱物はクリストバライトとトリディマイトである。

セメントペーストには結合材として、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、水酸化カルシウム、膨張材（現在では水酸化カルシウム）が確認された。なお、膨張材の水和膨張によるひび割れは確認されなかった。

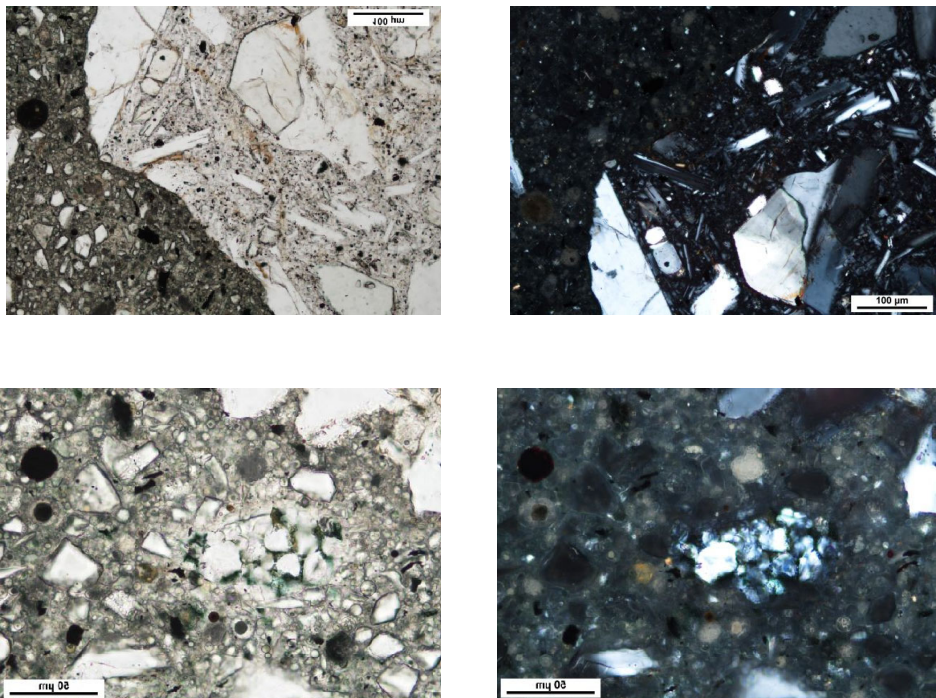


写真3-9 偏光顕微鏡写真（IBPM+N-EX）

IBPM+N-EXの偏光顕微鏡写真より、安山岩にASRによるひび割れは認められない。写真の安山岩は斜長石、単斜輝石、斜方輝石の斑晶と、それらの粒間で微細な鉱物（微細なクリストバライトなどを含む）から構成される。セメントペースト中には、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、膨張材などが認められる。主にフリーライムからなる膨張材は、現在では水和して水酸化カルシウムを生成している。膨張材の水和膨張によるひび割れは認められない。

表 3-28 偏光顕微鏡観察に基づく ASR の進行状況
(Katayama et al., 2008, Katayama 2012 に基づく)

試料名	岩石	ASR 進行段階 →					劣化度 評価
		i	ii	iii	iv	v	
		骨材			セメントペースト		
反応 りム	ゲルの滲み ・取り巻き	ひび割れ ゲル充填	ひび割れ ゲル充填	気泡 ゲル充 填			
IBPM+	安山岩	+					1
N-EX	総合評価						1

顕微鏡観察による評価

ASR の程度 : ◎ 顕著 ; ○ あり ; + 微量 ; 空欄 なし

劣化度の評価 : 1 軽微 (潜伏期に相当) ; 2 中程度 (進展期・加速期に相当) ;

3 顕著 (加速期・劣化期に相当)

表 3-29 ASR を発生した岩石の偏光顕微鏡観察結果

試料名	岩石	主要な構成鉱物 (構成量比の多いものから順に記載)
IBPM + N-EX	安山岩	斜長石, 単斜輝石, 斜方輝石, 不透明鉱物, クリソバライト, トリディマイト

(3) 「IBPM」

偏光顕微鏡下での観察写真を写真3-10に示す。また、ASRの観察結果を表3-30に、ASRを発生した岩石に含まれる鉱物の観察結果を表3-31に示す。

偏光顕微鏡観察の結果、安山岩にはASRによるひび割れは確認されなかった。したがって、ASRの劣化進行度は軽微（潜伏期）と判定された。安山岩のASR反応性鉱物はクリストバライトとトリディマイトである。

セメントペーストには、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、水酸化カルシウム、膨張材（現在では水酸化カルシウム）が確認された。なお、膨張材の水和膨張によるひび割れは確認されなかった。

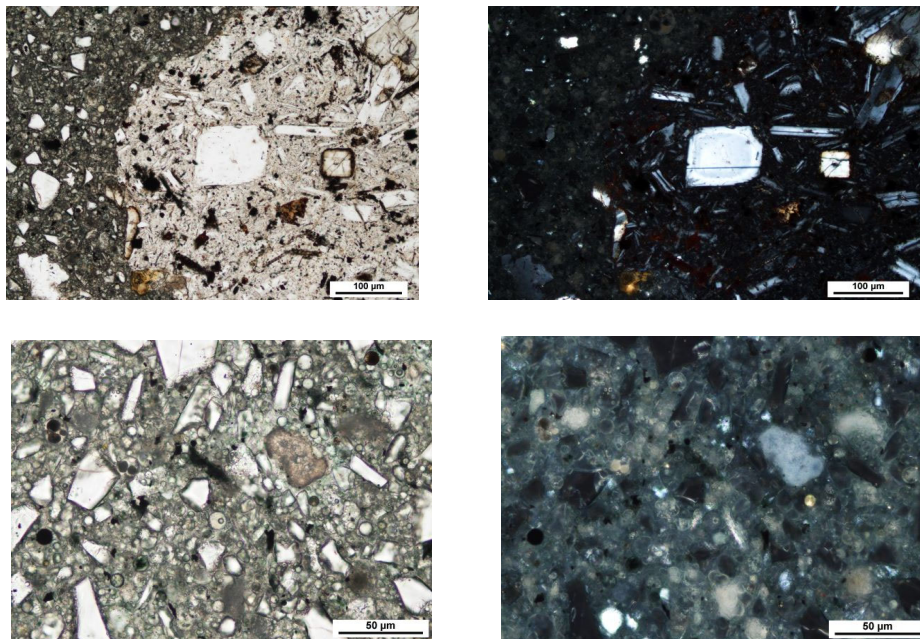


写真3-10 偏光顕微鏡写真（IBPM）

IBPMの偏光顕微鏡写真より、安山岩にASRによるひび割れは認められない。写真の安山岩は斜長石、単斜輝石などの斑晶と、それらの粒間で微細な鉱物（微細なクリストバライトなどを含む）から構成される。セメントペースト中には、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、水酸化カルシウムなどが認められる。水酸化カルシウムは部分的に炭酸化して、炭酸カルシウムを生成している。

表 3-30 偏光顕微鏡観察に基づく ASR の進行状況
(Katayama et al., 2008, Katayama 2012 に基づく)

試料名	岩石	ASR 進行段階 →					劣化度 評価
		i	ii	iii	iv	v	
		骨材			セメントペースト		
	反応 りム	ゲルの滲み ・取り巻き	ひび割れ ゲル充填	ひび割れ ゲル充填	気泡 ゲル充填		
IBPM	安山岩	+					1
	総合評価						1

顕微鏡観察による評価

ASR の程度 : ◎ 顕著 ; ○ あり ; + 微量 ; 空欄 なし

劣化度の評価 : 1 軽微(潜伏期に相当) ; 2 中程度(進展期・加速期に相当) ;

3 顕著(加速期・劣化期に相当)

表 3-31 ASR を発生した岩石の偏光顕微鏡観察結果

試料名	岩石	主要な構成鉱物 (構成量比の多いものから順に記載)
IBPM	安山岩	斜長石, 単斜輝石, 斜方輝石, 不透明鉱物, クリストバライト, トリディマイト

3. 10. 4 考察

(1) 反応性骨材

ASR 反応性鉱物には、急速膨張性のオパール、クリストバライト、トリディマイト、遅延膨張性の隠微晶質石英、急速膨張性と遅延膨張性の中間の反応性を示すものとして、ガラスとカルセドニーが挙げられる。今回、促進膨張試験に用いた安山岩は、偏光顕微鏡観察の結果、急速膨張性のクリストバライトとトリディマイトを含有していた。化学法でも本骨材は「無害でない」と判定され、さらに $Sc=573\text{mmol/L}$ と大きく非常に反応性の高い骨材であることが確認された。また、化学法において $Sc=573\text{mmol/L}$ である結果は、熱力学的に準安定であるクリストバライトやトリディマイトの Sc が大きくなる傾向（土木研究所 1990）²⁴⁾とも整合している。

(2) 蒸気養生による ASR への影響

IBPM は蒸気養生を行うことを前提として用いられるため、ASR 反応性の非常に高い安山岩を用いたモルタルで蒸気養生を行うことにより、ASR が生じないことを確認する必要がある。実際には、結合材に OPC を用いた供試体も含め、蒸気養生直後にモルタル表面には ASR ゲルの滲出や ASR によるひび割れは確認されなかった。したがって、結合材に IBPM を用いて 65°C で蒸気養生を行っても、ASR に関して、問題がないことが確認された。

(3) IBPM による ASR 抑制効果

ASR 高反応性の骨材を使用した IBPM にアルカリを添加し、 40°C 、湿度 95%以上の ASR 促進環境下で行った促進膨張試験（JISA 1146）でも、IBPM を使用したモルタルに有害な膨張は生じなかった。偏光顕微鏡下での観察結果においても、ASR は軽微（潜伏期）であり、促進膨張試験結果が裏付けられた（なお、この場合の「潜伏期」は、事実上の健全であり、今後の顕在化を意味する用語ではない）。したがって、IBPM は ASR 抑制効果が高いことが確認された。IBPM には ASR 抑制効果の高い高炉スラグ微粉末やフライアッシュが含まれていることが、ASR を抑制する要因と考えられる。また、膨張材を内割で 5% 添加した場合も、ASR は確認されず、かつ膨張材の水和膨張によるひび割れも確認されなかった。逆に、膨張材を添加しない供試体「IBPM」では、促進膨張試験で材齢 8 週まで収縮傾向を示していたことから、膨張材の添加が収縮抑制に寄与していることが窺える。

3. 10. 5 ASR まとめ

骨材（安山岩）の化学法，3 試料「OPC」・「IBPM+N-EX」・「IBPM」の促進膨張試験（モルタルバー法）および実体・偏光顕微鏡観察の結果，以下の結果が得られた。

- (1) 化学法の結果，骨材（安山岩）は $Sc=573\text{mmol/L}$ ， $Rc=113\text{ mmol/L}$ で，「無害でない」と判定された。
- (2) 偏光顕微鏡観察の結果，骨材（安山岩）には ASR 反応性鉱物として，急速膨張性（高反応性）のクリストバライトとトリディマイトが確認された。
- (3) 促進膨張試験（モルタルバー法）の結果，「OPC」は「無害でない」，「IBPM+N-EX」と「IBPM」は「無害」であった。
- (4) 「OPC」の偏光顕微鏡観察の結果，安山岩（骨材）からセメントペーストに進展したひび割れが確認され，さらに，セメントペースト中にも高密度にひび割れが生成していた。したがって，ASR の劣化進行度は中程度～顕著（加速期）と判定された。
- (5) 「IBPM+N-EX」と「IBPM」の偏光顕微鏡観察の結果，安山岩（骨材）に ASR によるひび割れの形成は確認されなかった。したがって，ASR の劣化進行度は軽微（潜伏期）と判定された。
- (6) 「IBPM+N-EX」と「IBPM」のいずれにおいても，膨張材の水和膨張によるひび割れは確認されなかった。
- (7) IBPM を結合材に用いたモルタルの ASR 抑制効果が非常に高いことが，促進膨張試験および偏光顕微鏡による組織観察からも確認された。

3. 1 1 まとめ

- ①収縮性状において、自己収縮では、OPC コンクリート (W/C=30%) の自己収縮ひずみは 400×10^{-6} 程度であったことが既往の研究で報告されている。これと同等の圧縮強度レベルの IBPM コンクリートの自己収縮ひずみは 340×10^{-6} であることから、自己収縮は OPC コンクリートと同等のレベルにあるといえる。
- ②拘束ひび割れは、各供試体に発生したコンクリートの拘束応力度を図と表に示すように、IBPM 供試体に発生した拘束応力度は材齢 140 日までに $2 \sim 3 \text{N/mm}^2$ 程度であり、他のコンクリートの 70~80% 程度であった。一方、曲げ強度に対する引張り強度の割合 (曲げ/引張り) では、IBPM は 2.6 程度、OPC と BB は 2.0 程度、FC は 1.7 程度であったことから、IBPM は強度面で最も余裕がある。これは、IBPM に混入した膨張材 (EX) が収縮低減に寄与していることが推察されるが、更なる検証が必要である。
- ③乾燥収縮では、IBPM コンクリート (35.6N/mm^2) と OPC コンクリート (35.5N/mm^2) の乾燥収縮ひずみは、乾燥期間 180 日で 500×10^{-6} 程度で同等であった。
- ④耐硫酸性では、IBPM コンクリートは成形方法 (振動締固め、振動締固め) によらず、OPC コンクリートと比べて 10 倍以上の優れた耐硫酸性を有している。
- ⑤耐塩害性では、土木学会の「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法 (案)」に準じて算出した塩化物イオンの拡散係数は、IBPM コンクリートが $0.237 \text{cm}^2/\text{年}$ 、OPC コンクリートが $1.319 \text{cm}^2/\text{年}$ であり、IBPM コンクリートの拡散係数は OPC コンクリートの約 18% であり著しく小さい値であることが分かった。
- ⑥中性化抵抗性では、促進中性化試験でのモルタル実験、曝露試験でのモルタルや実験コンクリートにおいても、中性化の進行は総じて OPC よりも IBPM の方が早い。しかし、促進中性化試験結果を基に、実環境における 100 年後の中性化深さを求めると 19.8mm となり、中性化残り 20mm 以下を満足するため、IBPM コンクリートにおいても 100 年間は鉄筋に腐食が発生しないことが推察される。
- ⑦耐凍結融解抵抗性では、パラフィン系エマルジョンの特殊混和材を用いることによって IBPM コンクリートの耐凍結融解性が著しく改善されることが明らかとなった。
- ⑧すり減り抵抗性では、IBPM モルタルの摩耗深さは、W の大幅な低減や低 W/B 化によって OPC モルタルよりも小さくなっている。このことから、水路等の流水環境下の構造物への利用を想定した場合には、IBPM コンクリートはコンクリートと同等以上の耐摩耗性を有していると考えられる。

⑨反射電子像

IBPM は単位容積当たりの粉体の空間率が低く、充填性の良い粉体構造となっていることが、蒸気養

生直後から優れた強度発現性を示す一因であると考えられる。また、本水和組織観察において、IBPM 中の水和物の密度が増加していることが示されたことや、材齢 91 日において IBPM 中の FA が反応していることが確認されたことから、FA のポズラン反応が寄与しているものと考えられる。なお、IBPM は長期材齢での強度増進が確認されている。

⑩細孔径分布

IBPM は細孔径分布の幅が狭く、 $0.03\mu\text{m}$ 以下の小径側に集中する傾向が見られることから、OPC よりも緻密性が高いことが顕著に表れている。これに対して、OPC の細孔率は材齢 14 日と材齢 91 日で同程度であり、メディアン細孔直径（比表面積基準）は材齢の経過に伴った変化は少なかった。

IBPM の緻密性を踏まえると、仮に中性化が進行しても水分や空気が入り難いため、鉄筋の腐食の発生は遅延する方向にあるものと考えられる。

⑪アルカリ骨材反応抑制効果

⑪-1 反応性骨材の選定

促進膨張試験に用いた安山岩は、偏光顕微鏡観察の結果、急速膨張性のクリストバライトとトリディマイトを含有していた。化学法でも本骨材は「無害でない」と判定され、さらに $\text{Sc}=573\text{mmol/L}$ と大きく非常に反応性の高い骨材であることが確認された。

⑪-2 蒸気養生による ASR への影響

結合材に OPC を用いた供試体も含め、蒸気養生直後にモルタル表面には ASR ゲルの滲出や ASR によるひび割れは確認されなかった。したがって、結合材に IBPM を用いて 65°C で蒸気養生を行っても、ASR に関して、問題がないことが確認された。

⑪-3 IBPM による ASR 抑制効果

ASR 高反応性の骨材を使用した IBPM にアルカリを添加し、 40°C 、湿度 95% 以上の ASR 促進環境下で行った促進膨張試験（JIS A 1146）でも、IBPM を使用したモルタルに有害な膨張は生じなかった。偏光顕微鏡下での観察結果においても、ASR は軽微（潜伏期）であり、促進膨張試験結果が裏付けられた。したがって、IBPM は ASR 抑制効果が高いことが確認された。

⑪-4 膨張材の効果

IBPM には ASR 抑制効果の高い高炉スラグ微粉末やフライアッシュが含まれていることが、ASR を抑制する要因と考えられる。また、膨張材を内割で 5% 添加した場合も、ASR は確認されず、かつ膨張材の水和膨張によるひび割れも確認されなかった。逆に、膨張材を添加しない供試体「IBPM」では、促進膨張試験で材齢 8 週まで収縮傾向を示していたことから、膨張材の添加が収縮抑制に寄与していることが伺える。

参考文献【第3章】

- 3-1) 田澤栄一, 宮澤伸吾: コンクリートの自己収縮ひずみの予測法に関する研究, 土木学会論文集, No.571/V-36, pp.211~219, 1997
- 3-2) 田澤栄一, 宮澤伸吾: セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響, 土木学会論文集, No.502/V-25, pp.43~52, 1994.11
- 3-3) 浅本晋吾, 加藤優典, 牧 剛史, 蔵重 勲: 改良型収縮拘束試験による収縮ひび割れ抵抗性に及ぼす養生温度および混和材置換の影響評価, Cement Science and Concrete Technology, Vol.66, pp.95-102, 2012
- 3-4) 藤井隆史, 大石幸紀, 沖花智之, 綾野克紀: コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす養生時の温度履歴の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.490-495, 2014
- 3-5) 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, pp.78~84, 2017 平成 29 年 12 月
- 3-6) 畑 実, 杉本克美, 林 悦朗, 宮澤伸吾: 高耐久性硬化体の諸性状と下水道管への適用に向けた基礎的研究, Cement Science and Concrete Technology, Vol.74, pp.420-427, 2021
- 3-7) 土木学会: EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法 (案), JSCE-G574-2013, 2013
- 3-8) 土木学会: 浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法 (案), JSCE-G572-2013, 2013
- 3-9) 増田 裕, 堺 孝司, 石井光裕, 塚常圭介: コンクリートの硫酸塩抵抗性に及ぼすフライアッシュおよびシリカフュームの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.297-302, 2007
- 3-10) 大城良信, 仲本文範, 山田義智, 大城 武: 海洋環境下における石炭灰を使用した RC 構造物の施工報告, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.789-794, 2002
- 3-11) 増田 裕, 堺 孝司, 石井光裕, 塚常圭介, コンクリートの硫酸塩抵抗性に及ぼすフライアッシュおよびシリカフュームの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.297-302, 2007
- 3-12) 一般財団法人日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針 (案)」2016.7
- 3-13) 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
- 3-14) 堀口賢一, 松元淳一, 河村圭亮, 坂本 淳: 低炭素型コンクリートを使用したコンクリート二次製品の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.213-218, 2016
- 3-15) 岡田明他, 早川隆之, 中村浩章, 丸田 浩: パラフィン系エマルジョンの凍結融解抵抗性に関する検討, 太平洋セメント研究報告, 第 181 号, pp.19-26, 2021
- 3-16) 長束 勇, 上野和弘, 渡嘉敷勝, 石井将幸: 水砂噴流摩耗試験機の試作とその性能評価, 農業農村工学会論文集, Vol.266, pp.25-31, 2010
- 3-17) 石崎倫朗, 浅賀喜与志, 大門正機, 高橋 茂: ポルトランドセメントの水和反応における各構成鉱物の反応率の測定, セメント技術年報, No.42, pp.40-43, 1988
- 3-18) 辛 軍青, 呉 承寧: セメント硬化体の細孔構造に及ぼす各種混和材の影響, プレストレストコンクリート工学会, 第 24 回シンポジウム論文集, pp.551-556, 2015.10
- 3-19) 日本規格協会, JIS A 6201 コンクリート用フライアッシュ, 2015

- 3-21) Katayama, T., Tagami, M., Sarai, Y., Izumi, S. & Hira, H. (2004): Alkali-aggregate reaction under the Influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan. *Materials Characterization*, Vol.53, nos.2-4, pp.105-122, Special Issue 29. Printed version of the *Proceedings, 9th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials (EMABM)*, Trondheim, Norway.
- 3-22) Katayama, T., Oshiro, T., Sarai, Y., Zaha, K., & Yamato, T. (2008): Late-Expansive ASR due to Imported Sand and Local Aggregates in Okinawa Island, Southwestern Japan. *Proceedings, 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR)*, Trondheim, Norway, pp.862-873.
- 3-23) Katayama, T. (2012): Late-expansive ASR in a 30-year old PC structure in Eastern Japan. *Proceedings, 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR)*, Austin, Texas, USA. 10p. paper 030411-KATA-05.
- 3-24) 建設省土木研究所(1990): 日本産岩石のアルカリシリカ反応性, 土木研究所資料, 第 2840 号, p.127

第4章 RC構造体の曲げ耐力と変形性能

4. 1 まえがき

第3章では、IBPM コンクリートを圧縮強度が 40N/mm^2 相当のヒューム管（開削管）に適用することを目標としてきた。

第4章では、IBPM コンクリートによる RC 梁供試体をプレキャスト製品工場で製造し、RC 構造物の静的曲げ載荷試験を行った。この時、OPC による普通コンクリートも同様に RC 梁供試体を製造して、IBPM コンクリートによる RC 梁供試体との曲げ耐力と変形性能について検証した。

RC 構造は、鉄筋で補強された構造で、ひび割れを許容しているが、鉄筋がひび割れを分散し、ひび割れ幅を抑制する構造特性を有する。また、梁部材は、構造部材として最も多く使用されている部材である。梁に作用する荷重は鉛直・水平・軸方向など多方向から作用し、曲げモーメント、せん断力、ねじりモーメント、軸力が断面力として発生する。梁の構造解析は、実構造部材を棒部材に置き換えて、構造力学の基本に基づいて断面力を算定している。応力算定においては RC 部材ではコンクリートの引張応力側を考慮しないなど多くの仮定を設けて設計されている。

RC の梁部材は、大略的に曲げモーメントとせん断力を受ける部材である。破壊に至る過程で発生するひび割れひび割れの特徴は、曲げモーメントが卓越する箇所は、引張り側から材軸と直交する方向に曲げひび割れが進展し、せん断力が卓越する箇所は斜めにせん断ひび割れが発生する。

4. 2 RC 梁の曲げ試験

4. 2. 1 実験方法

(1) 使用材料および配合

RC 梁供試体に用いた IBPM コンクリートの配合とフレッシュ性状、および OPC コンクリートの配合とフレッシュ性状を表 4-1 に当該配合における IBPM 結合材の混合比率を表 4-2 に示す。いずれの配合も、コンクリートの目標圧縮強度を 40N/mm^2 程度とした。

なお、表 4-1 に示すように IBPM コンクリートでは目標の圧縮強度を得るために W/B を OPC よりも小さくすることが必要である。このことから、IBPM コンクリートの配合は OPC コンクリートの配合よりも単位結合材量（粉体量）が多くなり粘性が増すため、スランプからスランプフローに変更した。

RC 梁供試体に用いた IBPM コンクリートと OPC コンクリートの配合は、型枠への打込み易さと材料分離を防ぐ目的でスランプフローを $500 \pm 50\text{mm}$ 、s/a を 45% とし、空気量は目標値を 2% に設定した。

表 4-1 RC 梁に用いたコンクリートの配合とフレッシュ性状

配合	Gmax (mm)	SLF (mm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m^3)						フレッシュ性状	
						W	IBPM	OPC	S	G	Sp	SLF	Air
IBPM	20	500±50	2.0±1.5	30	45	150	500	—	750	934	6.00	535mm	1.6%
OPC				50		175	—	350	819	1019	2.80	460mm	1.8%

表 4-2 RC 梁に用いた IBPM 結合材の混合比率

項目	FA	BFS	SF	EX	SA	CH	合計
単体量(kg/m ³)	199	199	29	29	25	19	500
混合比率(%)	39.8	39.8	5.8	5.8	5.0	3.8	100

(2) 練り混ぜ方法および養生条件

RC 梁の配合は、IBPM 製コンクリート梁と OPC 製コンクリート梁に用いた両者の圧縮強度が同等となるよう設定したものである。型枠に打込んだ IBPM コンクリートは棒バイブレータで締め固め、蒸気養生を行って、材齢 28 日まで工場の屋内において気中養生を行った。ここでの蒸気養生はプレキャスト製品工場の設備の都合により、蒸気養生の最高温度を 45℃以上に設定できなかったため、先述したモルタル実験や後述するヒューム管の製造における蒸気養生と、マチュリティーが同じ条件になるように最高温度の保持時間を長く設定した。その結果、他の蒸気養生条件と同様に、前置開始から常温に戻るまでのマチュリティーは 1050℃・h 程度となり、IBPM コンクリートの圧縮強度は W/B30% で約 40N/mm² が得られている。

(3) RC 梁の作製方法

IBPM コンクリートによる鉄筋コンクリート (RC) 梁供試体をプレキャスト製品工場では 2 本製造し、静的曲げ荷重試験を行って耐荷性能を評価した。この時、比較対象として OPC を用いた同一強度レベルのコンクリートによる RC 梁供試体も 2 本製造した。

材齢 28 日における当該コンクリートの力学特性を表 4-3 に示す。IBPM コンクリートの圧縮強度、引張強度、曲げ強度、静弾性係数およびポアソン比は、いずれも OPC コンクリートと同等な値が得られた。

表 4-3 RC 梁に用いたコンクリートの力学特性 (材齢 28 日)

配合	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	ポアソン比	静弾性係数 (kN/mm ²)
IBPM	39.6	2.97	4.76	0.19	28.3
OPC	34.7	2.58	4.58	0.20	27.7

図 4-1 は、RC 梁供試体の配筋図と静的曲げ荷重試験方法の概要を示したものである。引張鉄筋として D13mm, SD295A の鉄筋を 2 本配置し (鉄筋比 0.9%)、鉄筋の中央部にひずみゲージを貼り付けた。せん断補強鉄筋は使用していない。

コンクリートのひずみは、梁中央部の圧縮縁にひずみゲージを貼り付けて計測した。また、RC 梁のスパン中央部のたわみは、ダイヤルゲージを設置して計測した。

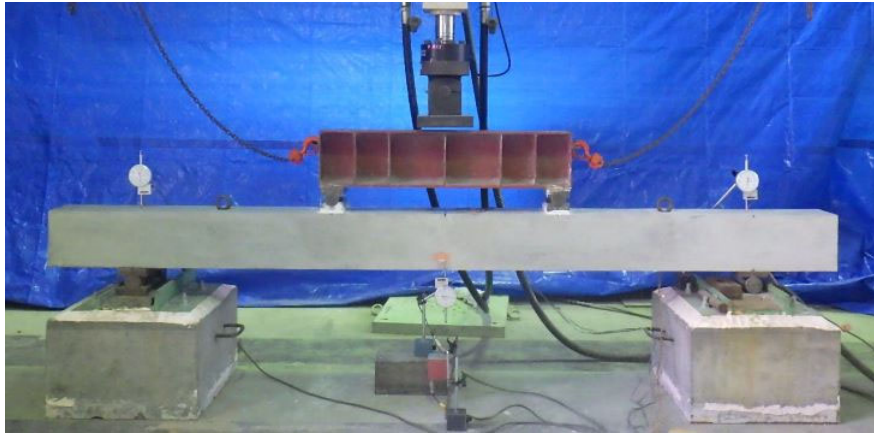


写真 4-1 RC 梁の静的曲げ荷重試験の状況

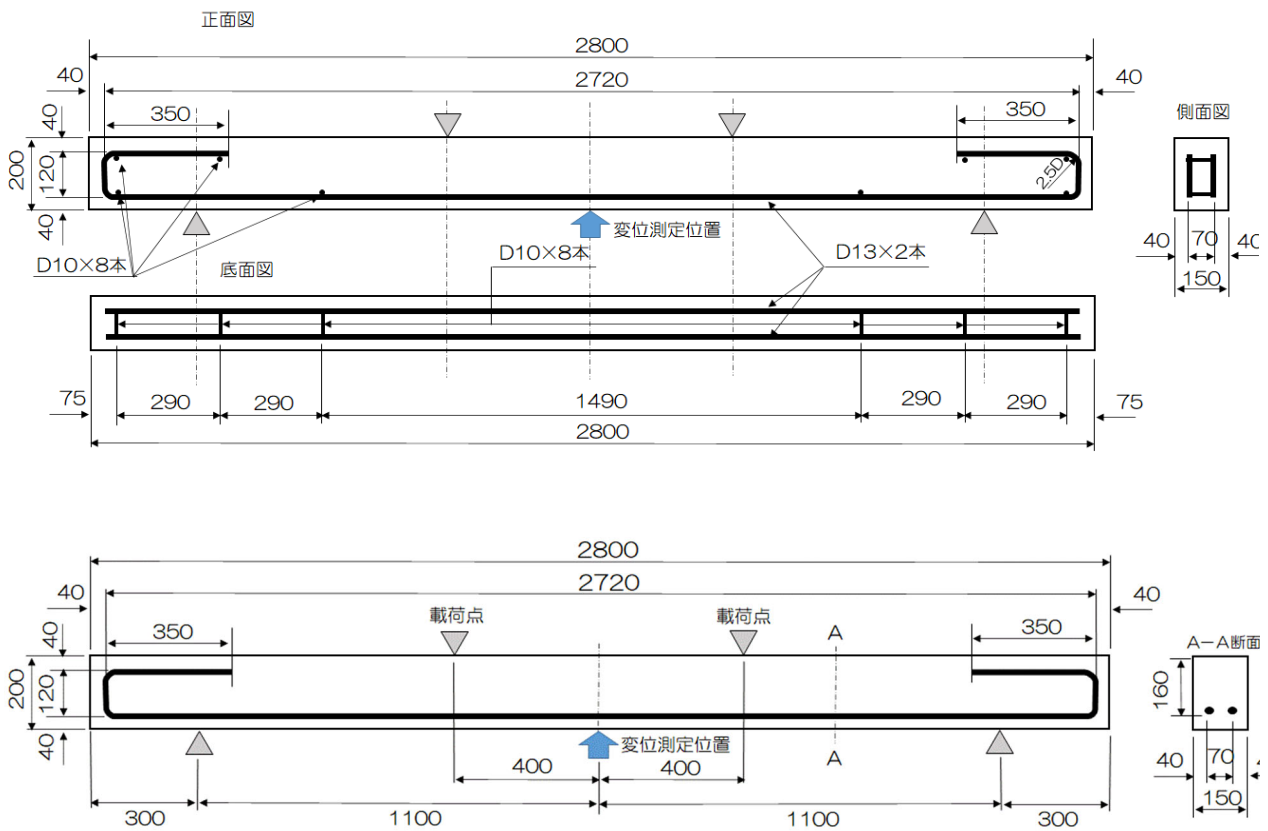
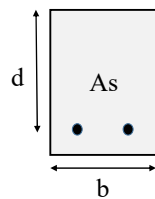


図 4-1 RC 梁の配筋図と静的曲げ荷重試験方法の概要



曲げ耐力 (M_u) の算定式

f_c : コンクリートの圧縮強度

f_y : 鉄筋の降伏強度

x : 圧縮縁から中立軸までの距離

$$M_u = f_y A_s \left(d - \frac{\beta x}{2} \right) \quad \beta = 0.52 + 80 \epsilon_{cu}'$$

$$x = \frac{f_y A_s}{k_1 f'_c \beta b} \quad \epsilon_{cu}' = \frac{155 - f'_c}{30000} \quad K1=0.85$$

(4) 曲げ試験方法

IBPM 製コンクリート RC 梁と OPC コンクリート製 RC 梁の曲げ載荷試験および曲げひび割れ発生荷重と曲げ破壊荷重の推定値の比較は、表 4-4 に示すとおりである。

表 4-4 RC 梁の曲げ載荷試験結果 (実測値と計算値)

梁の種別	No	曲げひび割れ荷重 (kN)				破壊荷重 (kN)				破壊形式
		実測値 Pcr,ob	平均値 Pcr,ob	計算値 Pcr,cal	実測値/計算値 Pcr,ob / Pcr,cal	実測値 Pcr,ob	平均値 Pcr,ob	計算値 Pcr,cal	実測値/計算値 Pcr,ob / Pcr,cal	
IBPM	1	10.4	10.5	9.6	1.1	46.5	47.1	30.9	1.5	曲げ引張り破壊
	2	10.5				47.6				
OPC	1	10.6	10.7	8.2	1.3	48.4	48.2	30.7	1.6	曲げ引張り破壊
	2	10.7				48.0				

4. 2. 2 実験結果および考察

(1) コンクリートの性状

IBPM 製コンクリート梁の曲げひび割れ発生荷重および曲げ破壊荷重は OPC 製コンクリート梁の場合と同等である。また、曲げ破壊荷重の推定値に対する実験値の比についても IBPM 製コンクリート梁は OPC 製コンクリート梁と同等の値となっている。このことから、IBPM 製コンクリート梁は OPC 製コンクリート梁と同等の曲げ耐荷性能を有していることが分かった。

(2) 曲げ試験結果

図 4-2 と図 4-3 は、鉄筋の応力度が 200N/mm² 程度に達した時点の曲げひび割れの発生状況を赤色で示したものである。青色は破壊直前におけるひび割れの発生状況である。終局的な曲げひび割れの発生状況においても、IBPM 製コンクリート梁と OPC 製コンクリート梁は類似しており、目視におけるひび割れ性状にはコンクリートの違いによる顕著な影響は見られない¹⁾。

図 4-4 は、RC 梁中央部のたわみと荷重の関係を示したものである。図 4-5 は、鉄筋およびコンクリートのひずみを示したものである。IBPM 梁と OPC 梁の荷重-たわみ関係は同様な傾向を示しており、同等の曲げ剛性を有していることが分かる。また、鉄筋降伏以降のたわみの増加傾向についても IBPM 梁は OPC 梁と同様の傾向を示していることから、IBPM を用いた RC 梁は、通常の RC 梁と同等の変形性能を有しているといえる²⁾³⁾。鉄筋およびコンクリートのひずみの増加傾向についても、IBPM 梁と OPC 梁に大差は認められない。

IBPM 梁と OPC 梁はいずれも曲げ引張破壊であり、同様の破壊形式を示した。これらのことから、IBPM 製 RC 梁も OPC 製 RC 梁と同様の構造解析ができることが分かった。

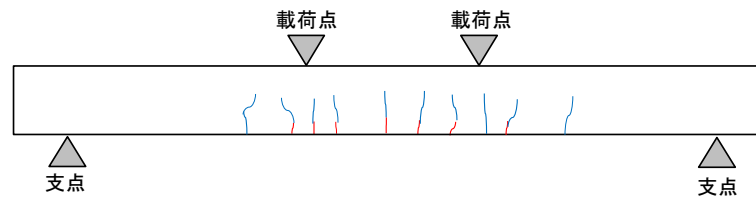


図 4-2 IBPM 製 RC 梁のひび割れ発生状況

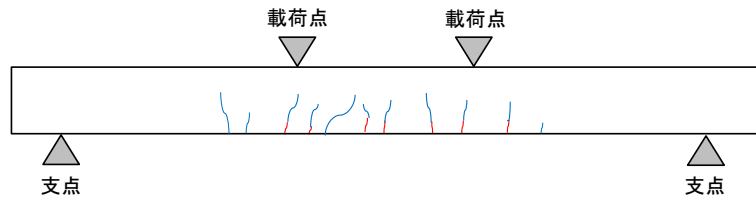


図 4-3 OPC 製 RC 梁のひび割れ発生状況

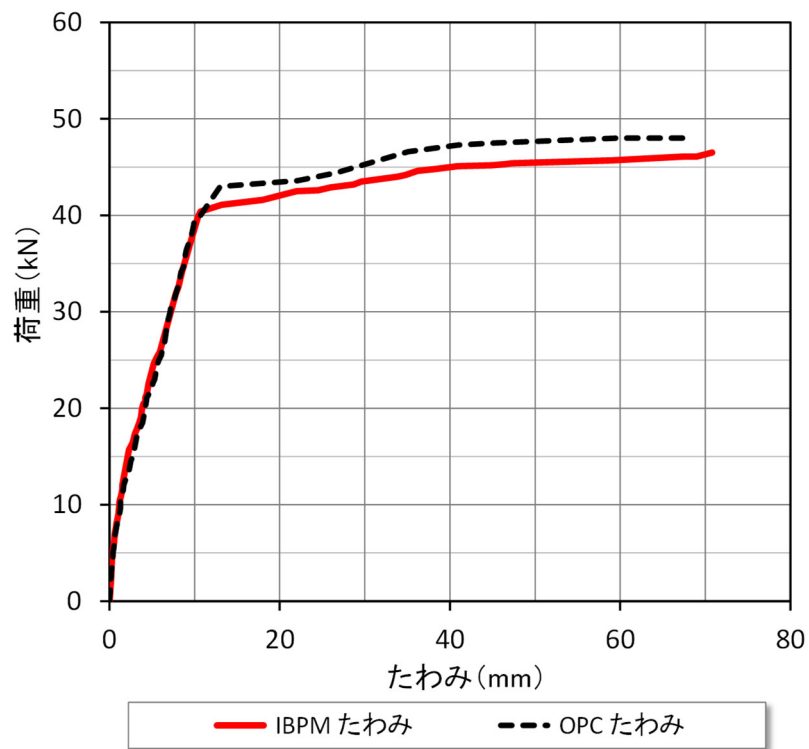


図 4-4 RC 梁中央部におけるたわみと荷重の関係

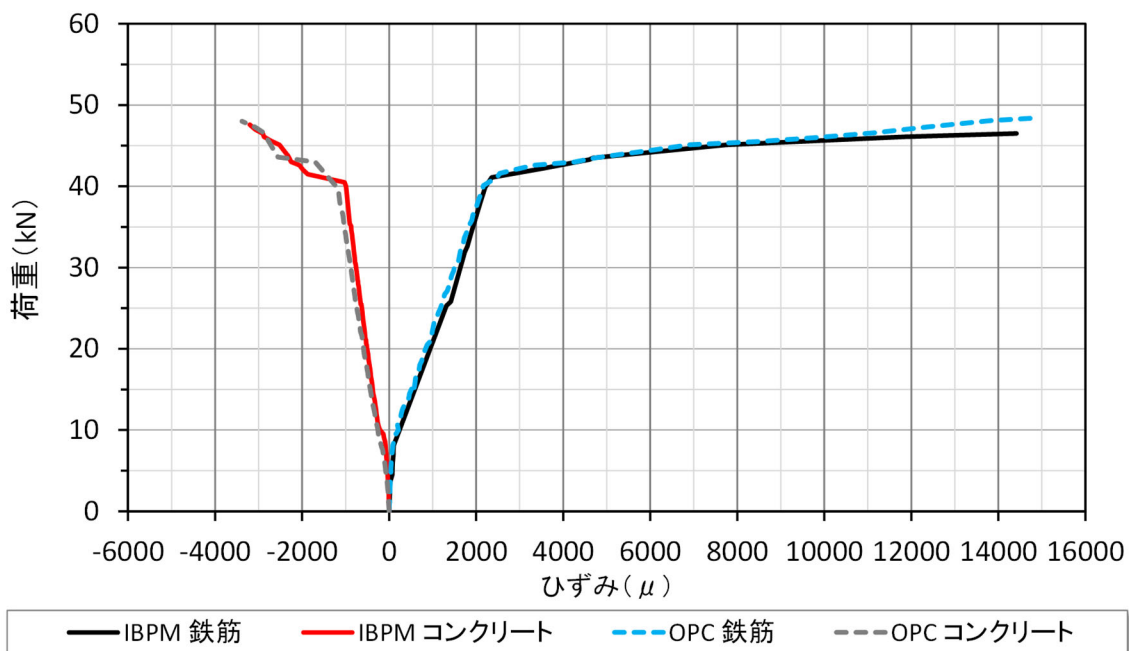


図 4-5 RC 梁中央部におけるコンクリートと鉄筋のひずみ

4. 3 まとめ

IBPM 製 RC 梁と OPC 製 RC 梁に関する曲げ試験の結果から、以下の知見が得られた。

- ① 鉄筋の応力度が $200\text{N}/\text{mm}^2$ 程度に達した時点の曲げひび割れの発生状況、および破壊直前におけるひび割れの発生状況は、IBPM 製コンクリート梁と OPC 製コンクリート梁は類似していた。
- ② IBPM 梁と OPC 梁の荷重-たわみ関係は同様な傾向を示しており、同等の曲げ剛性を有していることが分かった。また、鉄筋降状以降のたわみの増加傾向についても IBPM 梁は OPC 梁と同様の傾向を示した。このことから、IBPM を用いた RC 梁は、通常の RC 梁と同等の変形性能を有しているといえる。
- ③ IBPM 梁と OPC 梁はいずれも曲げ引張破壊であり、同様の破壊形式を示した。これらのことから、IBPM 製 RC 梁も OPC 製 RC 梁と同様の構造解析ができることが分かった。
- ④ 鉄筋およびコンクリートのひずみの増加傾向についても、IBPM 梁と OPC 梁に大差は認められない。
- ⑤ IBPM コンクリート（材齢 28 日）における圧縮強度、引張強度、曲げ強度、ポアソン比および静弾性係数は、いずれも OPC コンクリートと同等な値が得られた。

参考文献【第4章】

- 4-1) 原 夏生, 三島徹也, 山田尚義, 近藤眞生: 自己充填型高強度高耐久コンクリートを用いた RC 梁のせん断耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.925-930, 2001
- 4-2) 日本建築学会編集: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 2018.12
- 4-3) (社) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書, 2001

第5章 プレキャストコンクリート製品への適用

5. 1 まえがき

少子高齢化，人口減少，熟練労働者の不足など，山積される建設業界の諸問題を踏まえて，PCa 製品化により施工の効率化を図ることは必須であり，生産性向上に向けて「i-Construction」を推進することは我が国の方策として重要であると言われている。

第2章での検討により，IBPM を用いて圧縮強度が $30\sim 80\text{N/mm}^2$ のコンクリートの製造が可能であることが明らかとなった。また，用途や環境条件に応じて PCa 製品に要求される塩化物イオン遮塩性，耐硫酸性，耐摩耗性，凍結融解抵抗性は，OPC コンクリートと同等以上であることが示された。

第5章では，IBPM コンクリートを様々な PCa 製品，すなわちボックスカルバート，セグメント（コンパクトセグメント），ヒューム管（推進管），ヒューム管（開削管），マンホールの実物大供試体を PCa 製品工場で作製し，打込み・締固め時の施工性能を確認すると共に各製品の耐荷性能を検証した。また，ヒューム管として重要な性能である流水性能を確認する目的で，大規模な水理実験装置を設けて各種下水道管路の粗度係数を測定した。水理実験装置は，下水道管を縦断方向に4本繋いだ直線管路とし，その中を水が満管状態で流れる条件で行った。IBPM 製ヒューム管の比較対象は，普通コンクリート製ヒューム管（SA 混入の有無による2種類）と塩化ビニール管（薄肉間と厚肉管の2種類）の計5種類とした。

5. 2 遠心成形方法の概要

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良質な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。

5. 3 ヒューム管（開削管）の試作実験

5. 3. 1 使用材料および配合

ヒューム管の製造に用いた IBPM 結合材の混合比率を表 3-1 に，IBPM コンクリートと OPC 製コンクリートの配合およびフレッシュ性状を表 3-2 に示す。第2章で示したモルタル（ $\text{W/B}=34\sim 36\%$ ）の圧縮強度は，IBPM コンクリートの目標強度（ 40N/mm^2 ）より若干低かったが，本章のコンクリート実験では， W/B をモルタルと同等の 34% とした。

IBPM コンクリートは，単位結合材量（粉体量）が多いために，粘性が増すことから，スランプフローを 650mm 程度とし，遠心成形の締固めによって，高緻密化と強度増進が得られることを期待した。また，ヒューム管は地下に埋設されるため，凍害の影響を受けないことから，空気量は通常の OPC 製ヒューム管と同じ 2% とした。 s/a は OPC 製ヒューム管の製造方法である遠心成形において，広く採用されている 41% を用いたが，IBPM コンクリートにおける最適値については今後詳細な検討を要する。この時の IBPM コンクリートのフレッシュ性状は，スランプフローが 610mm ，空気量は 1.9% であった。

5. 3. 2 フレッシュ性状

IBPM コンクリートをプレキャスト製品工場の強制練り 2 軸型ミキサで練り混ぜ、JSWASA-1¹⁾に準拠して、IBPM 製ヒューム管（内径 250×長さ 2000 mm の B 型管）を遠心成形で製造した。

この時、IBPM コンクリートがミキサからバケットに排出された時点で試料を採取し、振動締固めにより円柱供試体（直径 100, 高さ 200mm）を作製して、蒸気養生を行った。モルタル実験では、蒸気養生の最高温度の保持時間を 4h としたが、ここでは IBPM に適した蒸気養生条件を検討した結果（前置時間 6h, 昇温 20°C/h, 最高温度 65°C, 保持時間 4h, 自然降温）から設定したものであり、その検討内容²⁾³⁾の概要を以下に再掲する。

IBPM はセメントコンクリートに比べて凝結時間が長く、始発が 14 時間、終結が 19 時間である。このため、前述したように IBPM には蒸気養生のような促進養生が必須であるが、凝結前や凝結過程で昇温を開始すると強度発現に悪影響を及ぼす可能性が考えられる。そこで、既報の研究²⁾では、IBPM コンクリートの圧縮強度に及ぼす蒸気養生の前置時間の影響について検討している。その結果、前置時間を一般的な条件よりも長めの 6 時間以上に延長すると、強度発現性が良好であった。

円柱供試体は、所定の材齢（1 日、7 日、14 日、28 日、56 日）まで、気温 20°C 湿度 60% の恒温恒湿室内で養生し、圧縮強度試験を行った。IBPM コンクリートの圧縮強度を図 3-1 に示す。IBPM コンクリートの圧縮強度は、脱型時に当たる材齢 1 日には 30N/mm² 以上が発現した。蒸気養生を行わない場合には、材齢 1 日の圧縮強度は約 3N/mm² であり、コンクリートが型枠面に付着して部分的に剥離が生じるなど、脆弱な状態であり、以降の強度発現に悪影響を与えることから脱型は困難であった。このことを踏まえると、蒸気養生によって IBPM の円滑な強度発現性が得られ、材齢 1 日で脱型可能な強度を十分に確保できることが分かった。さらに、蒸気養生後に気中養生を行うことで、材齢 28 日において目標強度の 40N/mm² に達した。これは、蒸気養生における前置時間を延長したことに加えて、ミキサの練混ぜ性能や骨材混入の影響などの要因によって、モルタルとコンクリートとの強度差が生じたものと考えられる。

表 3-1 IBPM 結合材の配合

項目	FA	BFS	SF	EX	SA	CH	合計
単体量(kg/m ³)	207	207	30	30	26	20	520
混合比率(%)	39.8	39.8	5.8	5.8	5.0	3.8	100

表 3-2 下水道管の製造に用いた配合

配合	Gmax (mm)	SLF or SL (mm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単体量(kg/m ³)						フレッシュ性状	
						W	IBPM	OPC	S	G	Sp	SLF or SL	Air
IBPM	20	650±50	2.0±1.5	34	41	177	520	—	655	960	5.20	610mm	1.9%
OPC※	20	80±20	2.0±1.0	36	41	158	—	440	734	1076	3.52	70mm	2.0%

※OPC製ヒューム管（SA混入）は、セメント量の5%に相当する量のSAを砂と置換。

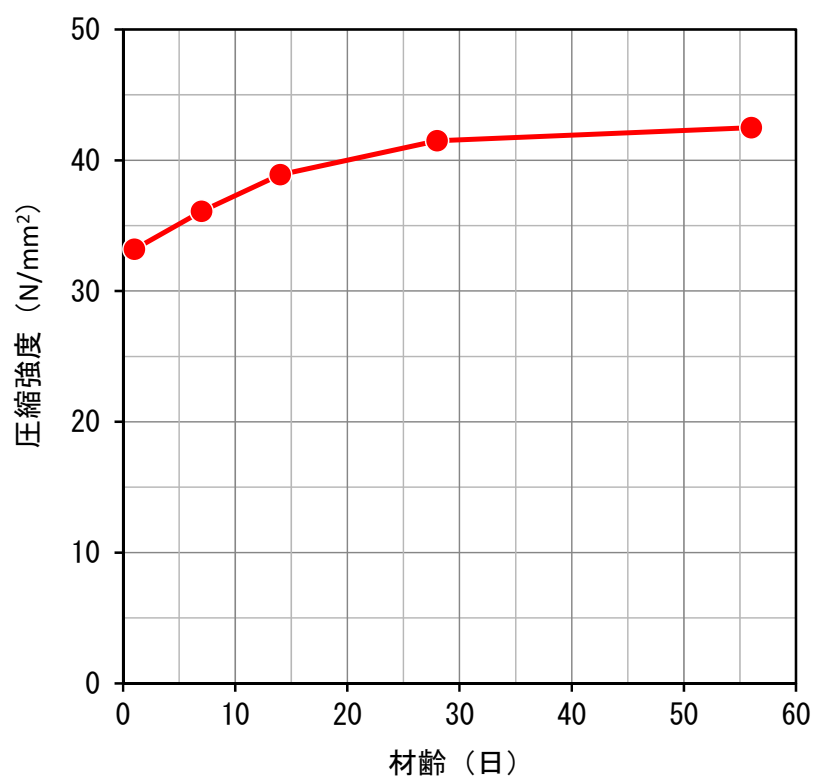


図 3-1 IBPM 製コンクリートの圧縮強度

5. 3. 3 実製品工場での製造実験

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 3-2 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 3-2 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 3-1 に示す直径 $\phi 250\text{mm}$ \times 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なものであり、直径 $\phi 2.6\text{mm}$ 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 $\phi 3.2\text{mm}$ 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。

5. 3. 4 ヒューム管（開削管）の耐荷性能に関する実験結果

外圧荷重の結果を荷重とたわみの関係でまとめた外圧試験結果を図 3-3 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、表 3-2 に示すとおりである。

写真 3-2 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、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。



写真 3-1 IBPM 製ヒューム管（開削管）の外観



写真 3-2 下水道管の外圧試験

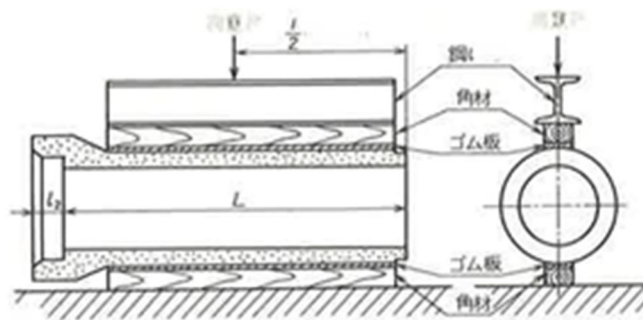
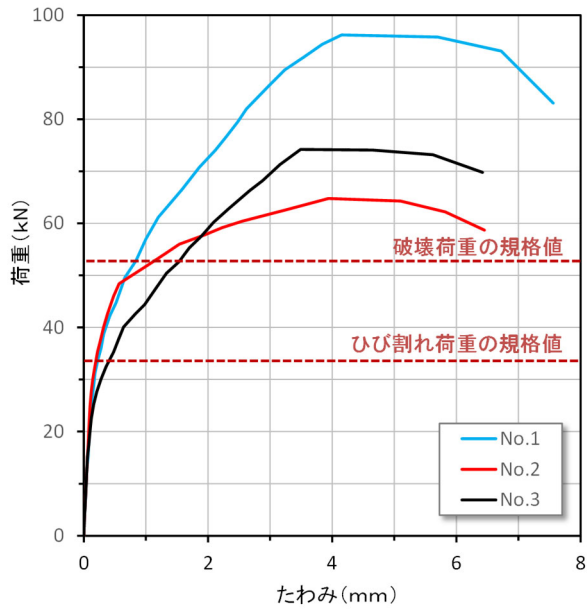
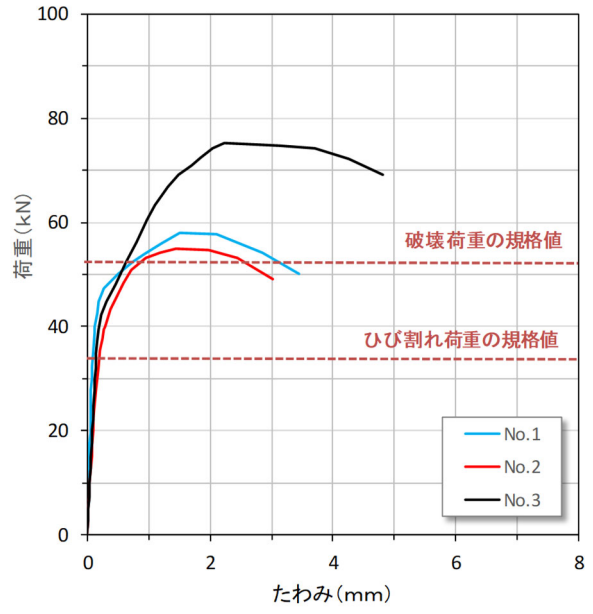


図 3-2 外発試験の概要



IBPM 製ヒューム管



OPC 製ヒューム管

図 3-3 外圧試験結果

5. 4 PCa 製品への適用

前述したヒューム管（開削管）の試作実験結果を踏まえて、IBPM コンクリートを様々な PCa 製品に適用することを計画した。各種 PCa 製品の实物大供試体の寸法、鉄筋量、締固め方法（振動締固め、遠心力締固め）およびフレッシュ性状に関する試験結果を表 5-4 に示す。これらの PCa 製品に用いた IBPM コンクリートの配合は、表 2-26 に示したとおりである。表中のマンホールは、3 分割して成形した後（上部斜壁部は振動締固め、中部直壁部は遠心力締固め、下部底板部は振動締固め）、これらを組合せて製品としている。なお、OPC コンクリートを用いて、各種 PCa 製品を同工場で製造する場合における通常のスランプ管理値を同表に示す。

表 5-5 は、IBPM コンクリートの遠心力締固めの条件を示しており、これは OPC を用いた通常の PCa 製品に適用される条件と同じである。振動締固めによって製造される PCa 製品についても、OPC を用いた通常の製品の場合と同じ振動機を使用し、振動締固めに要する時間も概ね同等であった。

表 5-4 に示すように、ボックスカルバート、セグメント、ヒューム管（推進管）においては、OPC を用いて製造する場合はスランプ 6~8cm に設定されているのに対して、IBPM コンクリートでは水結合材比が小さく粘性が高いことを考慮し、充填性を確保するためにスランプフロー 500~600mm 程度とした。すなわち、これらの製品に IBPM コンクリートを適用する場合はスランプフローで管理する配合とすることにより、適切な打込み・締固めが可能であった。なお、セグメントとヒューム管（推進管）に適用した IBPM コンクリートの U 形充てん高さ（高流動コンクリートのランク 3）⁴⁾ は 300mm 以上であった。

本研究で作製したセグメント（コンパクトセグメント）は、部材厚さが 135mm と極めて薄く鉄筋量も多いが、そのような条件においても通常の型枠振動機を使用することで十分な充填が可能であることが確認された。また、セグメントが湾曲した製品であり、しかも型枠上部のコンクリート投入口が狭いため、OPC コンクリート（スランプ 8cm）の打設では、フレキシブルバイブレーターで振動をサポートする必要があった。これに対して、IBPM コンクリート（スランプフロー 59.5cm）では型枠振動機のみで円滑な打込み及び締固めを行うことができた。

ヒューム管（開削管）及びマンホールにおいては、設計基準強度が低いことから、他の製品と比較すると W/B が大きく、それぞれ 25.9% 及び 30.0% である。これにより、コンクリートの粘性は比較的低いことから、スランプで管理することが適切であると判断された。なお、第 3 章で検討したヒューム管（開削管）は、表 2-26 に示した No.1 配合（ $W=177\text{kg/m}^3$ ）を使用しており、遠心締固め後に内面にペースト分のノロが多く発生し、内面を平滑に仕上げるための労力が増大した。これに対して、本研究では単位水量を大幅に減じた No.12 配合（ 114kg/m^3 ）を使用した結果、ノロの発生が減少し、管の内面仕上げ作業が軽減された。

以上のように成形された IBPM コンクリートによる各 PCa 製品の实物大供試体は蒸気養生を行い、その後、耐荷力試験を行うまで 28 日間程度気中養生を行った。その間、实物大供試体の寸法精度の確認を行った。すなわち、振動成形製品の場合は製品の幅、高さ、長さ、部材厚さなどを、遠心成形製品の場合は製品の内径、管厚、長さなどを測定した。その結果、いずれも通常の製品と同等の寸法精度を有することが確認された。表 5-6 は、IBPM コンクリートを用いて製造した各 PCa 製品の实物大供試体により実施した耐荷力試験の結果を示したものである。耐荷力試験は、表中の「規格」欄に示す指針類に準拠して行っており、外圧荷重または軸方向荷重を載荷して、ひび割れの発生および破壊荷重の試験値

が所定の荷重以上であることを確認するものである。試験の結果、すべてのPCa製品で規格値を満足しており、十分な耐荷力を有していることが認められた^{5)~9)}。

なお、表5-6示すコンクリートの設計基準強度は、OPCコンクリートを用いた通常のPCa製品の場合の値である。IBPMコンクリートについても、同じ設計基準強度を設定した。ただし、セグメントでは強力な振動締固めが行われるため、材料分離抵抗性を考慮して、IBPMコンクリートのW/Bを21.1%と低くしており、設計基準強度に比べて実際の圧縮強度が過大となっている。今後、より適切な配合に近づけるための微調整が必要である。

表5-4 各種製品の概要およびIBPMコンクリートのフレッシュ性状

コンクリートの種類	項目	ボックスカルバート	セグメント	ヒューム管(推進管)		ヒューム管(開削管)	マンホール
				1層目:外側	2層目:内側		
IBPM	形状寸法(mm)	幅1200 高さ1240 長さ1995	幅1000 湾曲部長さ2440 厚さ135	直径1200 長さ2340		直径250 長さ2000	外郭寸法 直径1100 高さ2040
	鉄筋量(kg/m ³)	103.6	240.0	47.9		48.3	46.5
	締固め方法	振動締固め	振動締固め	遠心力締固め		遠心力締固め	振動締固め、遠心力締固め
	W/B (%)	21.1	21.1	22.0		25.9	30.0
	SL(SLF)(cm)	(48.0)	(59.5)	(62.5)	(54.5)	8.0	16.5
	500mmフロー到達時間(秒)	—	37	28	—	—	—
	U形充てん高さ(cm) ※1	—	35.0	34.9	—	—	—
OPC	SL(cm) ※2	6.0±2.0	8.0±2.0	8.0±2.0	8.0±2.0	8.0±2.0	12.0±2.5

※1: 充填性のランク3(要害なし)³¹⁾ ※2: 生産管理値

表5-5 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

表 5-6 IBPM コンクリートを用いた各種プレキャストコンクリート製品の耐荷性能

PCa	材齢 (日)	設計 基準強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	項目	外圧荷重 又は 軸方向荷重		規格
					ひび割れ荷重	破壊荷重	
ボックス カルバート	14	50.0	59.9	規格値	66.7 kN/m 以上	300.0kN 以上	JIS A 5372 II 類 推奨仕様 ボックスカルバート 道路土工・カルバート工指針 社団法人日本道路協会
				実測値	96.2 kN/m	399.4 kN/m	
セグメント	28	42.0	65.4	計算値	35.7 kN 以上	79.1 kN 以上	コンパクトシルド工法協会 コンパクトセグメント製品規格 (t135)
				実測値	41.7 kN	148.7 kN	
ヒューム管 推進管	14	50.0	68.0	規格値	44.2 kN/m 以上	86.3 kN/m 以上	下水道推進工法用 鉄筋コンクリート管 JSWAS A-2
				実測値	55.5 kN/m	104.6 kN/m	
ヒューム管 開削管	14	40.0	42.5	規格値	16.7 kN/m 以上	25.6 kN/m 以上	JIS A 5372 付属書2(規定) 水路用遠心力鉄筋コンクリート管 下水道用鉄筋コンクリート管 JSWAS A-1
				実測値	23.7 kN/m	39.2 kN/m	
マンホール	14	25.0	35.0	規格荷重	150 kN	200 kN	下水道用鉄筋コンクリート製 組立てマンホール JSWAS A-11
				判定	規格荷重を載荷しても ひび割れの発生なし	規格荷重を載荷しても 破壊なし	

5. 5 マンホールへの適用

下水道用鉄筋コンクリート製組立マンホール (JSWAS A-11) に IBPM コンクリートを適用し、当該製品としての品質を確認した。組立マンホールは斜壁、直壁、底板の3製品で分割されており、斜壁と底板は振動成形、直壁は遠心成形によって製造される。

マンホールに適用した IBPM コンクリートの配合は表 5-7 に示すように W/B30%であり、斜壁、直壁、底板のすべてに共通したものになっている。実製品工場において3種類の製品を個々に製造する際に IBPM コンクリートを採取して圧縮強度を確認すると共に、分割した製品を組立て、軸方向耐圧試験を行って組立マンホールの品質を評価した。

IBPM コンクリートの圧縮強度は、出荷の時点で 25N/mm^2 以上でなければならない。また、組立マンホールの軸方向耐圧強さは 150kN の荷重に耐えることが求められる。

表 5-7 組立マンホールに適用した IBPM コンクリートの配合

Gmax (mm)	SL (cm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単分量 (kg/m^3)				
					W	IBPM	S	G	SP
15	16 ± 2.0	2.0 ± 1.5	30.0	41	120	400	757	1111	5.20

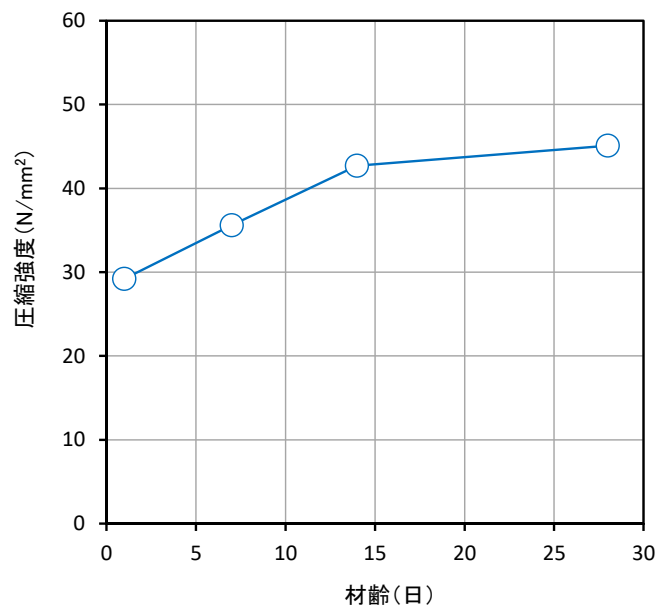


図 8-4 組立マンホールに適用した IBPM コンクリートの圧縮強度試験結果

表 5-8 組立マンホールの軸方向耐圧試験結果

項目	軸方向耐圧強さ	判定
ひび割れ荷重	150kN 載荷	異常なし
破壊荷重	200kN 載荷	異常なし



写真 5-3 組立てマンホールの外圧試験状況

5.6 ヒューム管（開削管）への適用

前述したように、ヒューム管（開削管）の試作を実工場で行った。このヒューム管（開削管）はコンクリートの目標強度を 40N/mm^2 としており、試作時においてもこれを満足したことでヒューム管の外圧試験も満足した。その後、様々な PCa 製品に適用するために、IBPM コンクリートの高強度化を目的に単位水量と水結合材比の低減による配合修正を行った。

その後、前述した IBPM コンクリートの高強度化に伴って表 5-9 に示す配合（W, IBPM 結合材の単分量, W/B）に修正した結果、図 5-5 のように IBPM コンクリートの圧縮強度は材齢 14 日で 48.7N/mm^2 が得られ、目標とした 40N/mm^2 以上を十分に満足した。また、当該ヒューム管（開削管）の外圧試験を行った結果、表 5-10 に示すように、ひび割れ荷重と破壊荷重を満足した。

表 5-9 ヒューム管（開削管）の配合表

Gmax (mm)	SL (cm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単分量 (kg/m^3)				
					W	IBPM	S	G	SP
15	8 ± 2.0	2.0 ± 1.5	25.9	41	114	440	747	1095	6.60

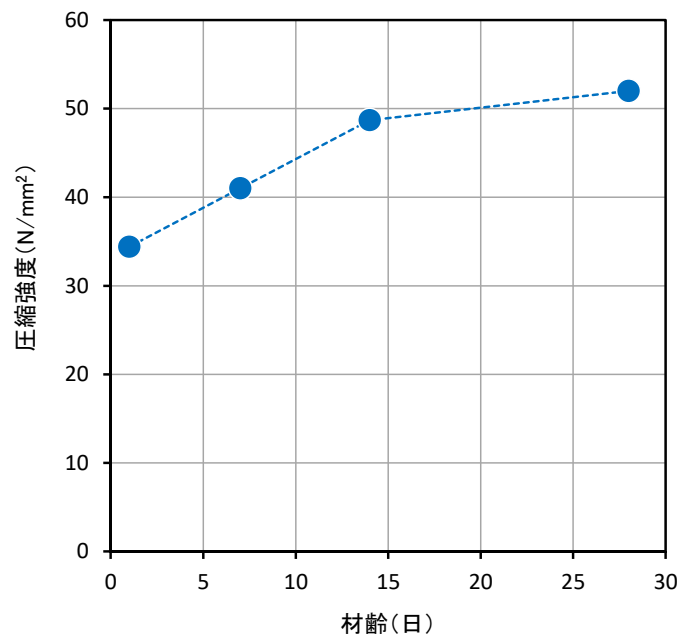


図 5-5 ヒューム管（開削管）コンクリートの圧縮強度

表 5-10 ヒューム管（開削管）の外圧試験結果

ヒューム管 開削管 (mm)	規格荷重 (kN/m)		試験荷重 (kN/m)		倍率	
	ひび割れ	破壊	ひび割れ	破壊	ひび割れ	破壊
内径300×2430	16.7	25.6	23.7	39.2	1.42	1.53



写真 5-4 ヒューム管（開削管）の外圧試験状

5.7 ヒューム管（推進管）への適用

推進管を実機製造した際に表5-11に示す配合のコンクリートを採取し、円柱供試体を作製して所定の材齢で圧縮強度試験を行った。材齢ごとの圧縮強度は図5-6に示すとおりであり、材齢14日における圧縮強度は58.6N/mm²であり、設計基準強度50N/mm²以上を満足した。

表5-11 ヒューム管（推進管）1層目の配合

Gmax (mm)	SL (cm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	IBPM	S	G	SP
20	55 ± 5.0	2.0 ± 1.5	22.0	41	110	500	734	1076	8.50

表5-12 ヒューム管（推進管）2層目の配合

Gmax (mm)	SL (cm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	IBPM	S	G	SP
15	55 ± 5.0	2.0 ± 1.5	22.0	50	108	490	895	912	8.33

※2層目はヒューム管（推進管）の内面仕上げに用いる配合

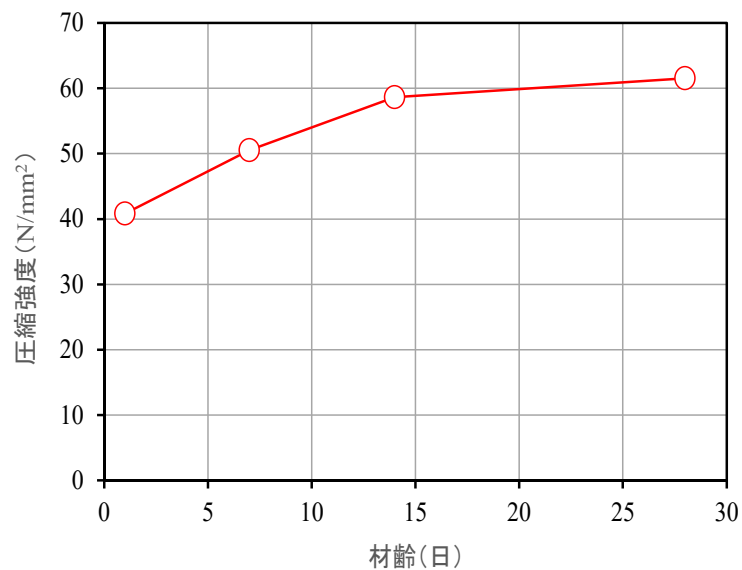


図5-6 ヒューム管（推進管）に用いたコンクリートの圧縮強度

次に、表 5-11 の配合を基に熊谷工場で実機製造した推進管（φ 1200mm×2430mm）の外圧試験を行った。その結果を図 5-7 と表 5-13 に示す様に、推進管のひび割れ荷重と破壊荷重は共に規格値を十分に満足した。当該推進管の外圧試験時の状況を写真 5-5 に示す。

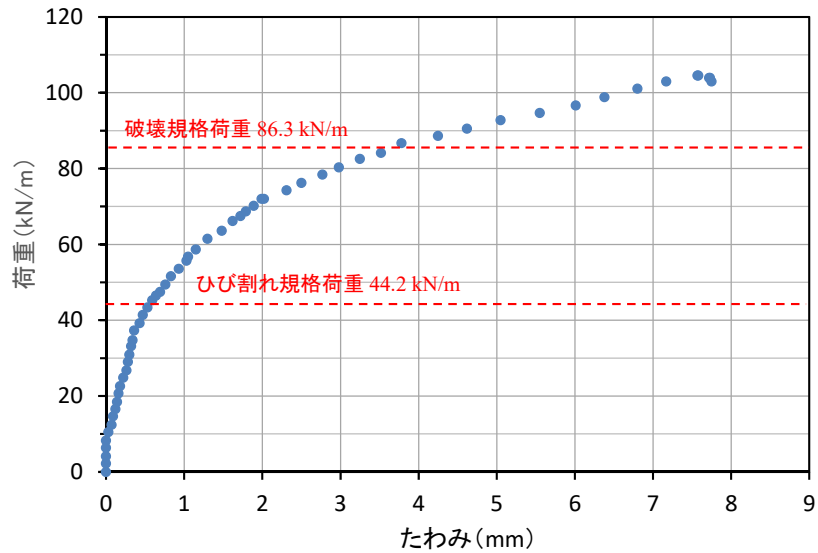


図 5-7 ヒューム管（推進管）の外圧試験結果

表 5-13 ヒューム管（推進管）の外圧試験結果

推進管 (mm)	規格荷重 (kN/m)		試験荷重 (kN/m)		倍率	
	ひび割れ	破壊	ひび割れ	破壊	ひび割れ	破壊
φ 1200 × 2430	44.2	86.3	55.5	104.6	1.26	1.21



写真 5-5 ヒューム管（推進管）の外圧試験状況

5. 8 セグメントへの適用

IBPM コンクリートをセグメント製品に適用する目的で、コンパクトセグメント製品に適用した。コンパクトセグメントは、A 型、B 型、K 型、I 型に 4 分割された製品を組み合わせ、直径 2,400mm 程度の小口径の管渠整備を中心に用いられるものである。したがって、トンネルなどのシールド工法で用いられるセグメントよりも製品寸法が小さく、製品厚さは 135mm の超薄型製品である。また、二次覆工の省略、トンネル断面の 30%削減、工期短縮などが可能であると言われている。

コンパクトセグメントに適用した IBPM コンクリートの配合は表 5-14 に示すように W/B21%であり、大幅に単位水量を少なくした低水結合材比 (W/B) である。実製品工場において 4 種類の製品を個々に製造する際に、IBPM コンクリートを採取して圧縮強度を確認すると共に、製品単体の曲げ試験、ジャッキ推力試験、吊手金具の引抜き試験を行って、コンパクトセグメントの品質を評価した。

表 5-14 コンパクトセグメントの配合

Gmax (mm)	SL (cm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	IBPM	S	G	SP
15	55 ± 5.0	2.0 ± 1.5	21.1	45	116	550	770	959	11.55



写真 5-6 セグメントの配筋状態



写真 5-7 IBPM コンクリートの型枠への打設

表 5-15 コンパクトセグメントの試験項目と目的

項目	目的
単体曲げ試験	曲げモーメントによるセグメントの断面理論計算と比較することにより、所定の単体性能を有しているかを確認するとともに、セグメント破壊時の断面耐力を測定することで設計値に対する安全率を求める。
ジャッキ推力試験	セグメント組立直後のシールド推進時を想定したジャッキ推力を作用させてひび割れ等の有無を測定することで耐推力性能を確認した。
吊手金具の引抜き試験	主として吊手金具の引抜きに対するせん断耐力を確認する試験であり、载荷にあたっては、曲げの影響をできるだけ小さくし、1 リング重量の 1.5 倍を载荷して、ひび割れ等の有無を測定することで確認した

単体曲げ試験の方法は以下のとおりである。(A型セグメントを使用)

- ① 荷重方向：鉛直方向
- ② 荷重方法：中央2点荷重
- ③ 荷重装置：外圧試験機 (500kN)
- ④ 測定項目：中央部鉛直荷重
- ⑤ 測定段階：10kN ピッチ

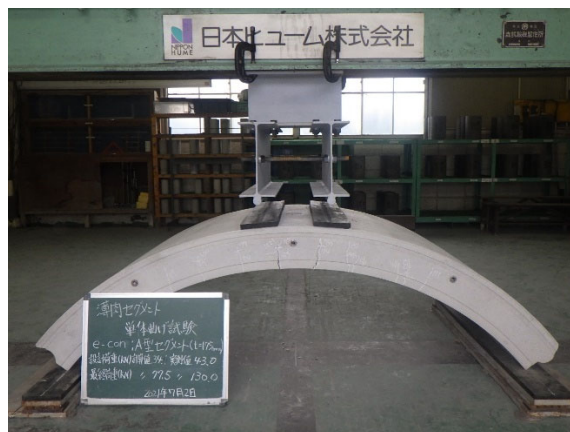


写真 5-8 コンパクトセグメントの単体曲げ試験

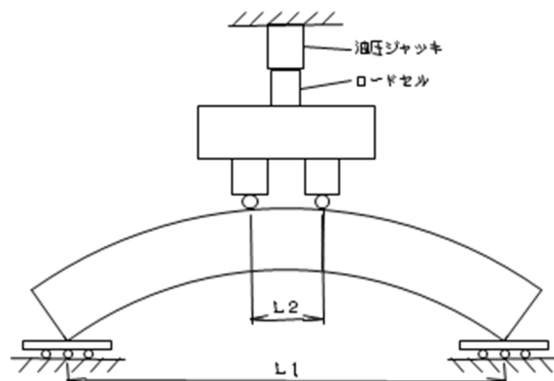


図 5-8 単体曲げ試験の概要図

L1=1898mm

L2= 300mm

推力試験の方法は以下のとおりである。(K型セグメントを使用)

- ① 荷重方向：鉛直方向
- ② 荷重方法：スプレッダーによる面荷重
- ③ 荷重装置：外圧試験機 (3000kN)
- ④ 測定項目：ひび割れ発生等の有無
- ⑤ 測定段階：連続で 1200kN まで荷重 (200kN ピッチで計測)



写真 5-9 コンクリートセグメントの推力試験

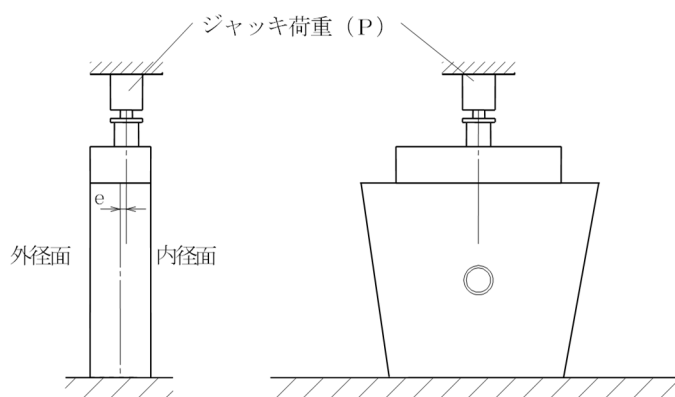


図 5-9 推力試験の概要図

吊手金具の引抜き試験方法は以下のとおりである。（K型セグメントを使用）

- ① 荷重方向：センターホールによる荷重
- ② 荷重段階：連続荷重とした。
- ③ 荷重装置：反力架台 100kN ジャッキ，100kN ロードセル
- ④ 測定項目：ひび割れ発生等の有無
- ⑤ 測定段階：引抜き許容耐力 33kN（1リングの重量）まで連続荷重確認後，最終荷重 50kN まで連続荷重とした。



写真 5-10 コンパクトセグメントの吊手金具の引抜き試験

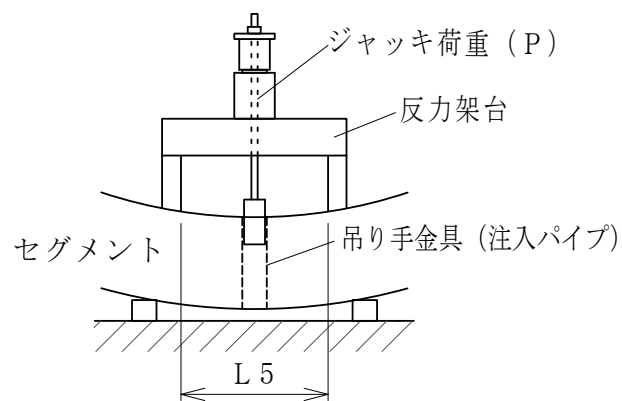


図 5-10 吊手金具の引抜き試験の概要図

表 5-16 コンパクトセグメントの単体曲げ試験結果

試験項目		荷重 (kN)		モーメント (kN・m)		合否判定
		計算値	実測値	計算値	実測値	
単体曲げ試験	設計荷重	35.7	41.7	16.2	18.6	合格
	最終荷重	79.1	148.7	33.6	61.4	

表 5-17 コンパクトセグメントに用いた IBPM コンクリートの圧縮試験結果

養生方法	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)		規格値 (N/mm ²)	判定
製品同一養生	28	65.8	65.4	42.0	合格
		63.3			
		67.2			

表 5-18 コンパクトセグメントの推力試験結果と吊手金具の引抜き試験結果

試験項目		荷重 (kN)	異常の有無	合否判定
ジャッキ推力試験	許容耐力	800	無し	合格
	耐力	1200	無し	
吊手金具引抜き試験	引抜き許容耐力	33	無し	合格
	引抜き強さ	50	無し	

円柱供試体（直径 100mm×高さ 200mm）を JIS A 1132 に準じて作成し、セグメントと同一養生を行い、材齢 28 日で圧縮強度試験を行った結果、規格値（42.0N/mm²）を満足していることを確認した。

5. 9 ボックスカルバートへの適用

5. 9. 1 使用材料および配合

IBPM コンクリート製ボックスカルバート（以降 IBPM BOX）と OPC コンクリート製ボックスカルバート（以降 RC BOX）について、PCa で実機製造を行った。実機製造に用いた配合は、IBPM コンクリートは表 2-26 の No.21 に、OPC コンクリートを表 5-19 に示す。

IBPM BOX の配合は、PCa ボックスカルバートに用いられている一般的な配合を参考にして、設計基準強度を 50N/mm^2 とした。養生方法は蒸気養生（前置 $20^\circ\text{C}\times 6\text{h}$ 、昇温 20°C/h 、最高温度 $65^\circ\text{C}\times$ 保持 4h 、自然降温）の後、脱型して材齢 14 日まで気中養生を行った。IBPM コンクリートのスランプフロー試験と空気量試験は、JIS A 1150 と JIS A 1128 に準拠した。

外圧試験時には JIS A 1108 に準拠して、直径 $10\times$ 高さ 20cm 円柱供試体の圧縮強度試験を実施し、同時に静弾性係数も測定した。鉄筋の付着強度は JSCE-G 503-2013 に準拠してコンクリートの打設時に鉄筋の呼び名 D16 の供試体を作製して実施した。なお、引張強度試験は JIS A 1113、せん断強度試験は JSCE-G50-2013、曲げ強度試験は JIS A 1106 に準拠した。この時、コンクリート供試体の養生は製品と同一養生とした。

5. 9. 2 ボックスカルバートの作製方法

ボックスカルバートの形状とコア採取位置を図 5-11 に、配筋図を図 5-12 に示す。外圧試験の際にボックスカルバートの頂版部からコア供試体を採取した。コア供試体の直径は部材厚を考慮して 45mm とし、JIS A 1107 を参考にして圧縮強度試験を実施した。

表 5-20 にフレッシュコンクリートの試験結果を示すように、スランプフローと空気量は目標値の範囲内にあった。表 5-21 に円柱供試体の圧縮強度試験結果とコア供試体の圧縮強度試験結果を示すように、設計基準強度 50N/mm^2 を満足した。なお、基準値は道路土工カルバート工指針⁹⁾によるもので、材齢は 14 日強度とした。コア供試体の採取位置に応じて RC BOX よりも IBPM BOX の強度差が大きい傾向にあるが、これは製造時の振動時間の違いによって骨材の沈下が大きかった影響であるものと考えられる。いずれも設計基準強度と静弾性係数の基準値を満足した。

表 5-22 にボックスカルバートに用いた IBPM コンクリートと OPC コンクリートの物性試験結果を示す。ボックスカルバートの設計に必要な基準値は、圧縮強度、せん断強度、鉄筋付着強度、静弾性係数であり、実測値はこれらを十分に満足した。

5. 9. 3 外圧試験方法

ボックスカルバートの外圧試験方法は日本下水道協会規格（JSWAS A-128）に準拠した。図 5-13 に示すように、ボックスカルバートの頂版の引張り側（内面側）の変位を 2 か所、頂版の内面側とハンチの両側壁に位置する外側のコンクリートに発生したひずみを各々 5 か所測定した。ひび割れは目視観察とし、ひび割れ荷重はひび割れ発生時の荷重、破壊荷重は載荷試験機の荷重が上昇しなくなった時点の荷重を破壊荷重とした。ボックスカルバートの外圧試験結果は、表 5-23 にひび割れ荷重と破壊荷重として示した。

5. 9. 4 フレッシュコンクリートと外圧試験結果

上載荷重による頂版内面の変位量は、横軸の変位量が2mmまでの範囲を図5-14と図5-15に示す。変位量は2か所で計測し、その平均値を示した。また、ひび割れ発生時の変位量は両者共に0.55mm程度であり、上載荷重に対して殆ど同じ挙動を示した。

頂版内面側のコンクリートに発生したひずみを図5-16と図5-17に示す。曲げひび割れ発生時にコンクリートに発生したひずみは、両者共に概ね 100×10^{-6} 程度であることから、IBPM BOXはRC BOXと同等の伸び性能を有しているものと考えられる。また、頂版内面のコンクリートにひび割れが発生するまでの荷重においても両者共に同様な傾向を示した。

頂版内部の内鉄筋と外鉄筋に発生したひずみを図5-18、側壁外鉄筋に発生したひずみを図5-19に示す。IBPM BOXとRC BOXに発生したひずみには僅かな差異は見られるものの、概ね同様な傾向を示した。

以上の結果から、設計基準強度が同一条件であれば、IBPM BOXはRC BOXと同様な設計が可能であるものと考えられる。

表5-19 OPCコンクリート製ボックスカルバートの配合

G _{max} (mm)	SLF の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単体量 (kg/m ³)						合計
					水 W	結合材 OPC	膨張材 EX	骨材		混和剤 Sp	
								砕砂 S	砕石1505 G		
15	50±7.5	2.0±1.5	38.0	45.0	160	400	20	810	1009	4.20	2399



写真5-11 ボックスカルバートの外圧試験状況

表 5-20 ボックスカルバートに用いたコンクリートのフレッシュ性状

種別	気温 (°C)	コンクリート 温度 (°C)	スランプ フロー (mm)	空気量 (%)
IBPM BOX	19.2	21.0	420×450	1.4
RC BOX	19.0	20.8	425×435	1.4

表 5-21 ボックスカルバートに用いたコンクリートの圧縮強度と静弾性係数

種別	円柱供試体			コア供試体				
	圧縮強度		静弾性 係数	採取 位置	圧縮強度	平均値	静弾性 係数	平均値
	(N/mm ²)				(N/mm ²)		(kN/mm ²)	
基準値	材齢14日	50.0	33.0	—	—	—	—	—
IBPM BOX	材齢1日	31.0	35.3	a	58.4	67.7	36.2	37.2
	材齢7日	50.3		b	69.2		37.2	
	材齢14日	59.9		c	75.4		38.3	
RC BOX	材齢1日	29.5	33.4	a	75.0	75.9	33.2	34.7
	材齢7日	49.6		b	75.6		34.0	
	材齢14日	55.5		c	77.1		36.9	

表 5-22 ボックスカルバートに用いたコンクリートの品質特性値

種別	引張 強度	せん断 強度	曲げ 強度	圧縮 強度	静弾性 係数	鉄筋付着 応力度
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²	N/mm ²
基準値	—	0.27	—	50.0	33.0	2.0
IBPM BOX	4.1	9.2	5.4	59.9	35.3	7.3
RC BOX	3.8	8.4	5.4	55.5	33.4	7.6

表 5-23 ボックスカルバートの曲げ試験結果

種別	ひび割れ 規格荷重 (k/m)	ひび割れ荷重		比率 (試験値/規格値)	破壊荷重 (kN /m)
		(kN/本)	(kN/m)		
IBPM BOX	66.7	191.9	96.2	1.44	399.4
RC BOX		193.3	96.9	1.45	392.0

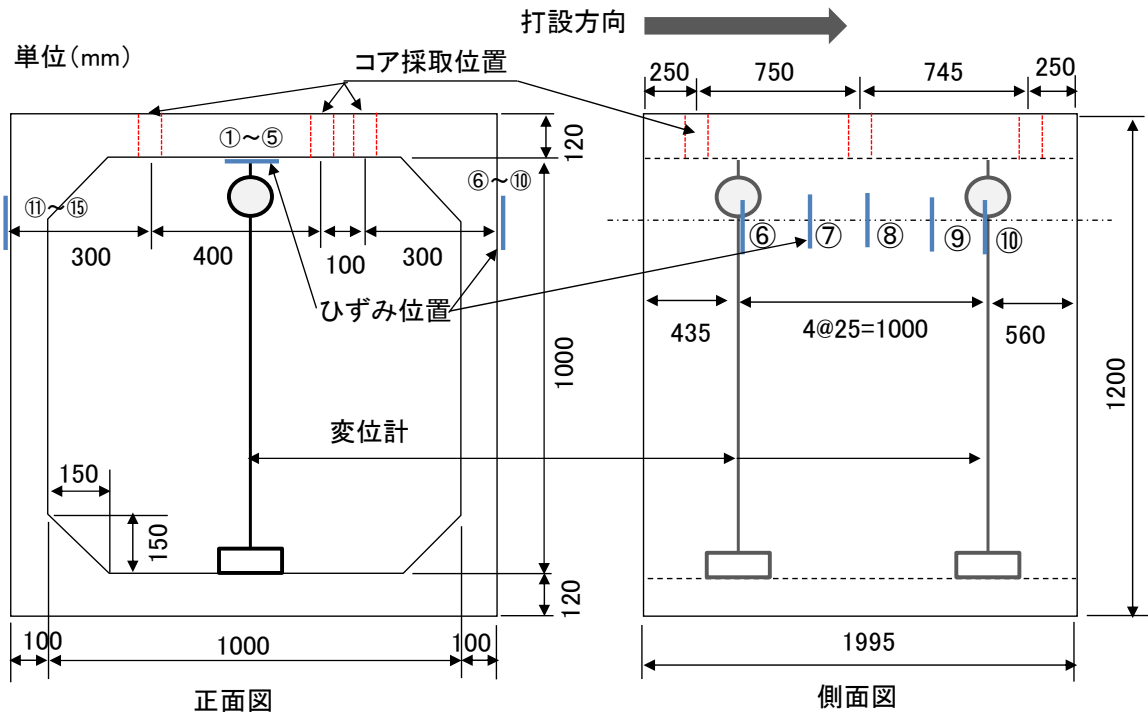


図 5-13 ボックスカルバートの計測位置

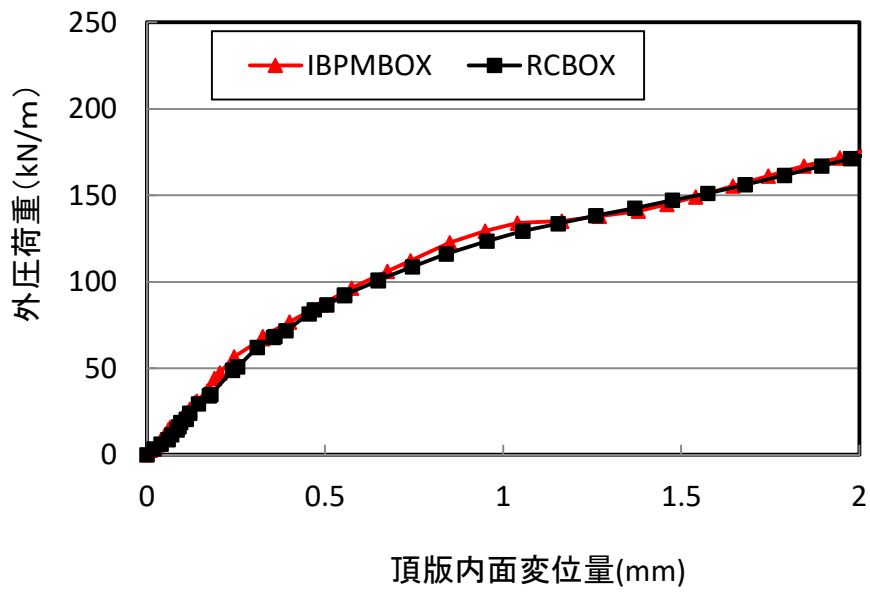


図 5-14 頂版内面変位量と外圧荷重

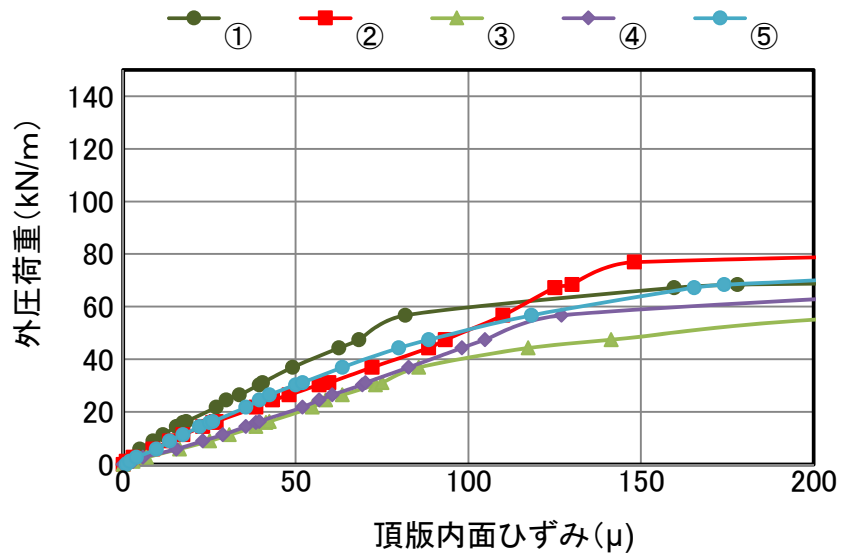


図 5-15 頂版内面ひずみと外圧荷重

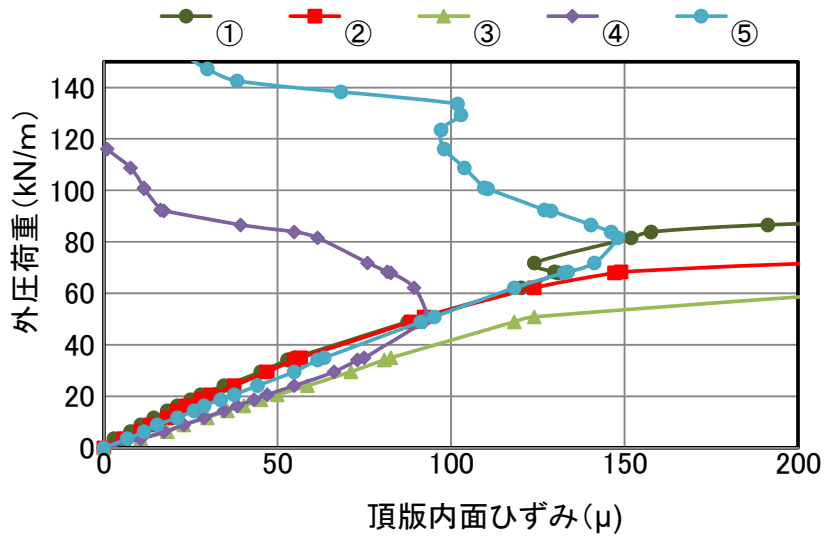


図 5-16 頂版内面ひずみと外圧荷重

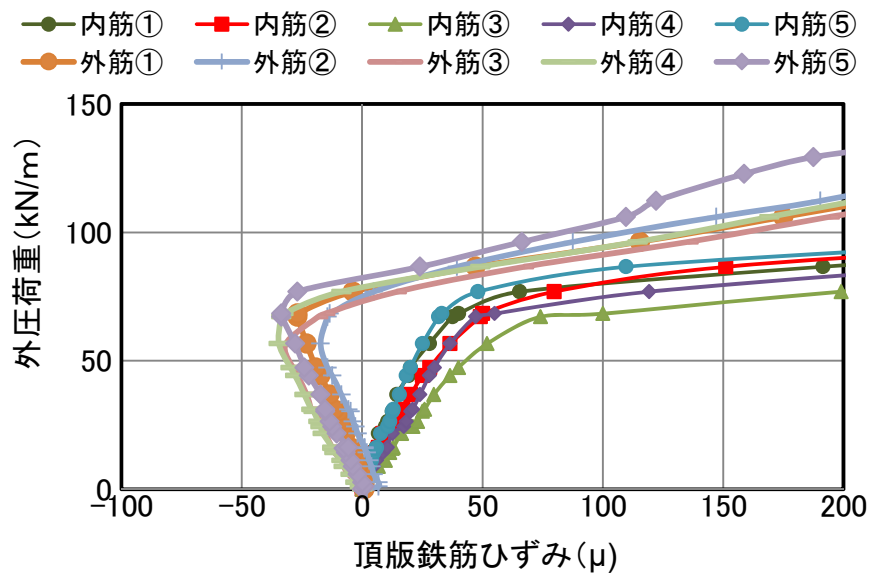


図 5-17 頂版鉄筋ひずみと外圧荷重

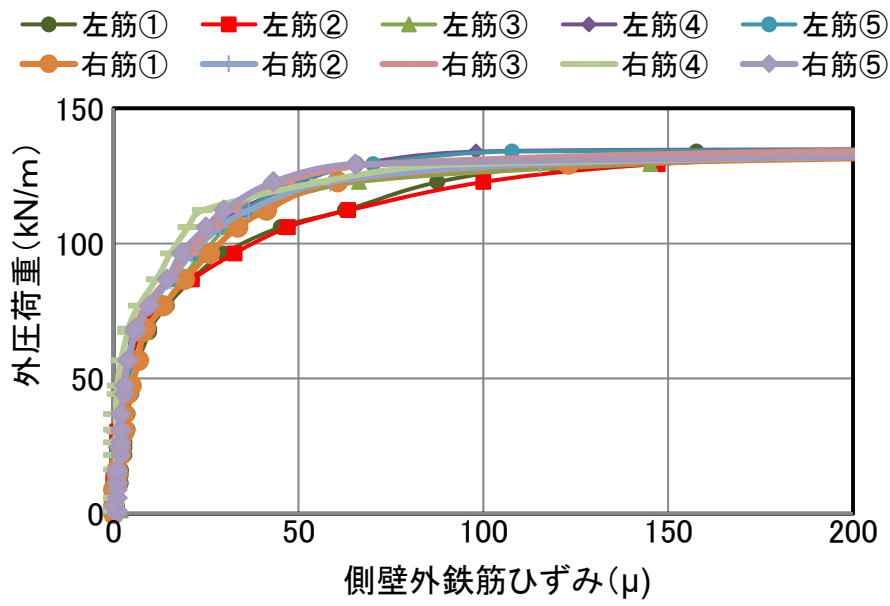


図 5-18 側壁外鉄筋ひずみと外圧荷重

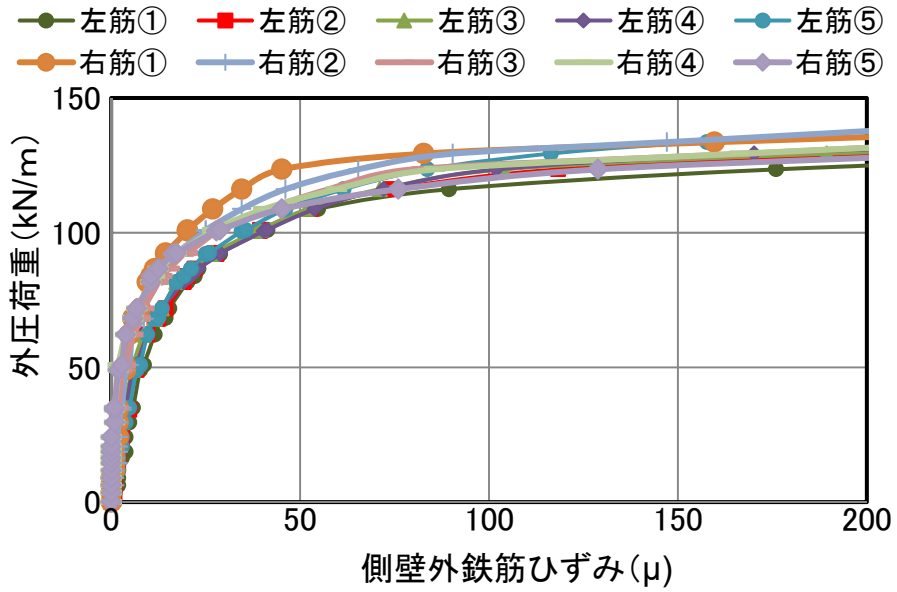


図 5-19 外壁外鉄筋ひずみと外圧荷重

5. 10 流水性能

5. 10. 1 水理実験の概要

ヒューム管の流水性能は、ヒューム管に求められる重要な性能である。特に、粗度係数 n は管の材質による流水性能の違いを評価する指標としてヒューム管の設計に用いられている。一般に、ヒューム管の粗度係数の設計値は $n=0.013$ とされており、塩化ビニール管の $n=0.010$ と比較すると流下性能が低く評価されている¹⁰⁾。

本研究では、IBPM 製のヒューム管（開削管）の流水性能を評価するために、写真 5-12 と図 5-20 に示す水理実験装置を設け、直線管渠における各種ヒューム管の粗度係数を測定した。

管渠（検査管）の上流側には最大 $0.2\text{m}^3/\text{s}$ 程度の給水が可能な給水管を接続し、流量測定用の電磁流量計と流量調節用のバルブを設置した。また、下流端には排水管を接続して管渠内を満管にするための水位調整用バルブを設けた。このように、検査管の上流側に長さ 4m の給水管、下流側に長さ 4m の排水管を設けることで、管内を流れる水の状態を均一なものとした。また、Manning の粗度係数は流れの状況によって変化することから、本研究では水が満管状態で流下する条件で測定を行った。

すべての管渠には、孔径 1mm のピエゾメータを 1m 間隔で 8 箇所設置して、水頭による圧力分布を測定した。管径は 250mm とし、長さ $2,000\text{mm}$ の管を 4 本接続して計測区間を $8,000\text{mm}$ とした。

水理実験の対象としたヒューム管は 5 種類であり、その品質規格を表 5-24 に示した。その内訳は、①ヒューム管（SA 無混入）、②粒度調整灰を混入したヒューム管（SA 混入）、③IBPM 製ヒューム管、④塩化ビニール管の VU 管（肉厚管）、⑤塩化ビニール管の VP 管（薄肉管）である。



写真 5-12 下水道管水理実験装置

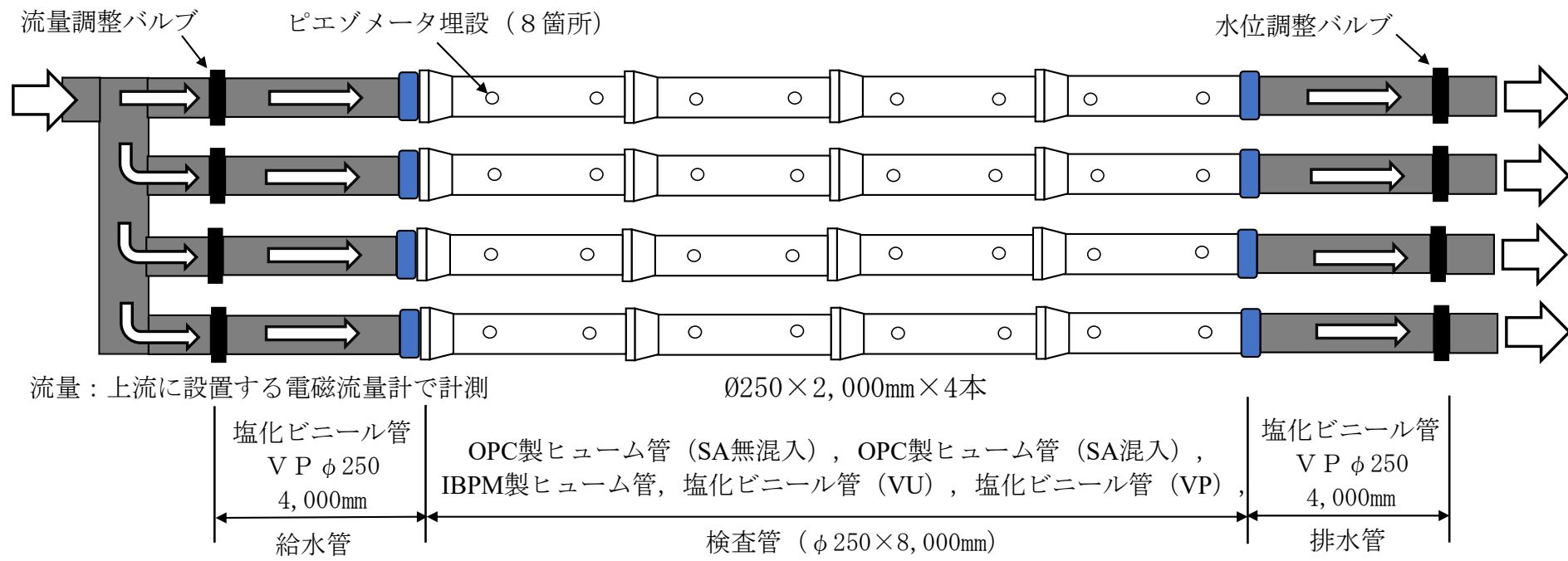


図 5-20 下水道管水理実験装置の概要図

表 5-24 水理実験の対象とした下水道管の概要

No	下水道管の種類	製品規格	部材厚さ (mm)	ひび割れ荷重 (kN/m)	破壊荷重 (kN/m)	質量 (g/m)	耐荷力 (MPa)	耐熱温度 (°C)
1	OPC製ヒューム管(SA無混入)	JSWAS A-1	28.0	16.7	25.6	—	—	—
2	OPC製ヒューム管(SA混入)※					—	—	—
3	IBPM製ヒューム管					—	—	—
4	塩化ビニール管(VU)	JIS	7.8	—	—	9758	0.6	60
5	塩化ビニール管(VP)	K 6741	12.7	—	—	15481	1.0	

※No.2 OPC製ヒューム管 (SA混入) は、セメント量の5%に相当する量のSAを砂と置換。

5. 10. 2 粗度係数の計算方法

水理実験ではヒューム管の一般的な流速とされている 0.6m/s~3.0m/s の範囲で水を流し、ピエゾメータの計測値から得られる動水勾配から、摩擦損失水頭を測定した。次に、摩擦損失水頭の測定結果に基づいて式 (1) (Darcy-Weisbach 式) を用いて摩擦損失係数を求め、さらにヒューム管の流れのレイノルズ数 Re が 10^5 以上の条件で、式 (2) (Colebrook-White 式) からレイノルズ数を算出した¹¹⁾。

そして、摩擦損失係数とレイノルズ数の算出結果を Moody 図にまとめて、摩擦損失係数とレイノルズ数の相関から管渠に水が流れる際の粗度係数を推測した。また、式 (3) (Manning 式) と式 (1) から式 (4) を求め、摩擦損失係数 f を計算した¹²⁾。

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

ここに、 h_f : 摩擦損失水頭 (m), L : 管路長 (m) D : 管径 (m), v : 平均流速 (m/s),
 f : 摩擦損失係数, g : 重力加速度 (m/s²)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2.0 \cdot \log_{10} \left(\frac{k}{D} + \frac{9.35}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

ここに、 Re : レイノルズ数 ($=v \cdot D/\nu$), ν 動粘性係数(1.007 m²/s), k : 絶対粗度(m), k/D : 相対粗度

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{D}{4} \right)^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (3)$$

ここに、 n : 粗度係数, R : 径深 (A/L), I : 水路勾配

$$f = \frac{8gn^2}{(D/4)^{1/3}} \quad (4)$$

5. 10. 3 実験結果および考察

図5-21はヒューム管内の流速が0.6m/s～3.0m/sにおけるレイノルズ数と粗度係数の相関を示す。この結果からも明らかなように、IBPM製ヒューム管の回帰直線は、塩化ビニール管の回帰直線に近い。この結果から、レイノルズ数が概ね $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$ の範囲におけるIBPM製ヒューム管の粗度係数は、塩化ビニール管の粗度係数である $n=0.009$ とほぼ同等であると考えられる。

IBPM製ヒューム管で使用されているフライアッシュは、非晶質の二酸化けい素を主成分とする球状の微粒子である。これに加えてIBPMには、粒径が $1\mu\text{m}$ 以下で球状の超微粒子($200,000\text{ cm}^2/\text{g}$ 程度の比表面積)であるシリカフュームも使用している。このため、遠心成形によってこれらの密度の軽い微粒子が管の内面に集積され、IBPM製ヒューム管の内面にはガラス質で滑らかな表面テクスチャーが形成されたものと推察する¹³⁾。これらのことによって、IBPM製ヒューム管の粗度係数がヒューム管と比較して小さくなり、流下性能の向上に繋がったものと考えられる。

以上のことから、IBPM製ヒューム管は、一般のセメントコンクリート製のヒューム管と比較して優れた流下性能を有しているといえる。

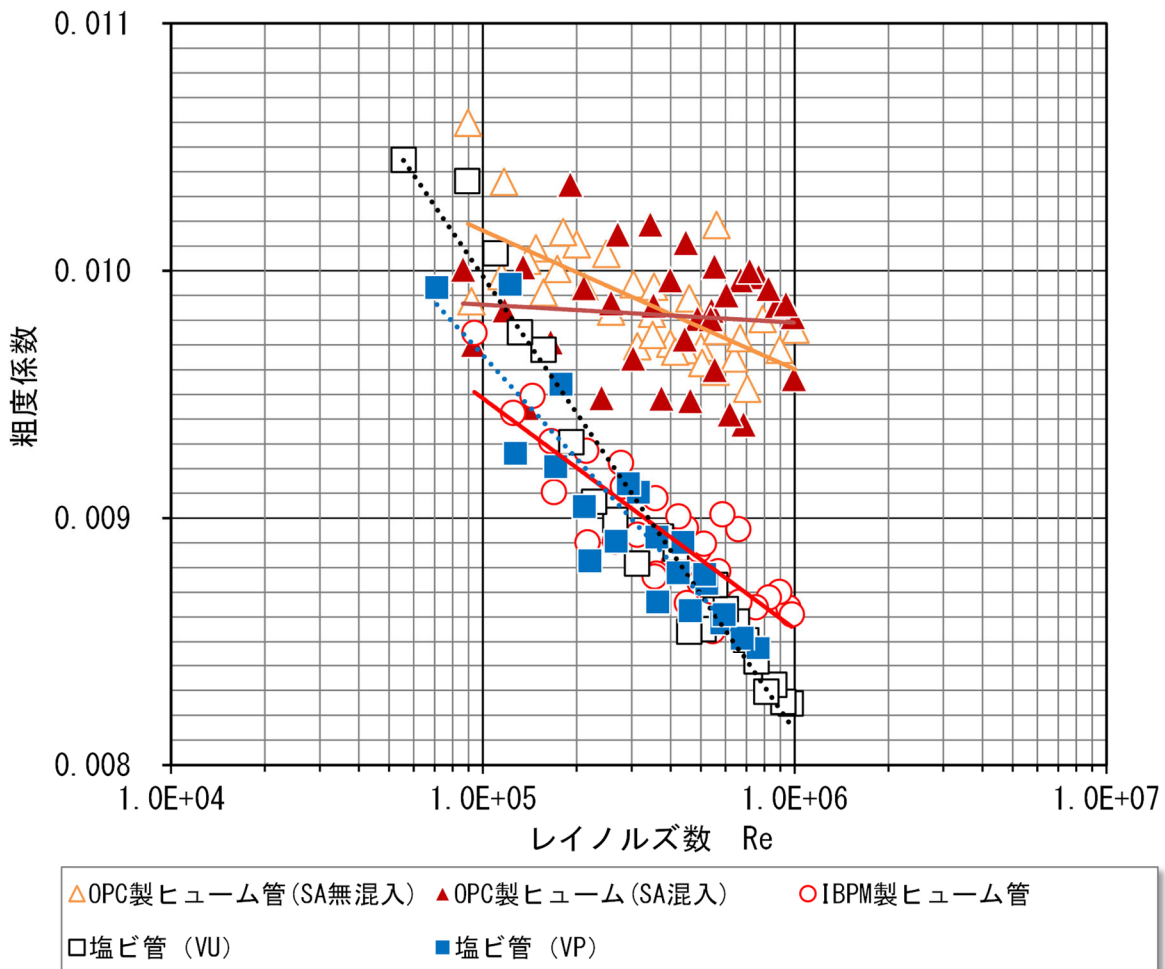


図5-21 粗度係数の測定結果

5. 1 1 環境負荷低減効果

5. 1 1. 1 産業副産物の混入率

IBPM 結合材の使用材料は、表 5-25 に示すようにフライアッシュ、高炉スラグ微粉末、シリカフェーム、膨張材、水酸化カルシウム（消石灰）の 5 種類である。このうち産業副産物は、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、シリカフェームの 3 種類で、IBPM 結合材の 90% を占める。このことはゼロエミッションの実現に向けて大きな貢献を果たすものであり、近年、世界中で求められている地球環境の保全を踏まえると、IBPM 結合材を使用した PCa コンクリート製品の付加価値を高めるものである。

なお、高炉スラグ微粉末は IBPM 結合材の 51% を占めており、土木学会の「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案）」コンクリートライブラリー152 に適合している¹⁴⁾。

表 5-25 IBPM 結合材の混合比率と産業副産物の割合

記号	種類	混合比率 (%)	産業副産物
FA	フライアッシュ	33	90
BFS	高炉スラグ微粉末	51	
SF	シリカフェーム	6	
EX	膨張材	6	—
CH	水酸化カルシウム（消石灰）	4	—
合計		100	90

5. 1 1. 2 低炭素化（CO₂ 排出量の削減率）

IBPM 結合材としての CO₂ 排出原単位は、予め算出（オーソライズ）されている各材料の CO₂ 排出原単位と混合比率との関係から求まる。表 7-8 に OPC（普通セメント）、BB（高炉セメント B 種）、IBPM 結合材の CO₂ 原単位（kg-CO₂/t）から CO₂ 排出量を求めて示した。その結果、IBPM 結合材の CO₂ 排出量は 100.8 kg-CO₂/t であり、他よりも CO₂ 排出量が低いことが顕著である。

表 5-26 IBPM 結合材の CO₂ 排出量原単位と CO₂ 排出量

種別	使用材料	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /t)	混合比率 (%)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /t)	
OPC	OPC	764.3	100	764.3	764.3
BB	BFS	26.5	40	10.6	469.2
	OPC	764.3	60	458.6	
IBPM 結合材	FA	19.6	33	6.5	100.8
	BFS	26.5	51	13.5	
	SF	19.6	6	1.2	
	EX	764.3	6	45.8	
	CH	844.6	4	33.8	

表 5-27 IBPM コンクリートに用いた各種材料の CO₂ 排出量原単位

材料	W	e-CON	OPC	EX	S	G
CO ₂ 排出量原単位 (kg-CO ₂ /t)	0.2	100.8	764.3	764.3	2.9	3.7

PCa 製品を実際製造した配合から、IBPM コンクリート製品と普通コンクリート (OPC) 製品の CO₂ 排出量を求めた。この結果から、普通コンクリート製品に対する IBPM コンクリート製品の CO₂ 排出量の削減率を求め表 7-9 と表 7-10 に示した。この対象とした PCa 製品は、ボックスカルバート、セグメント (コンパクトセグメント)、ヒューム管 (推進管)、ヒューム管 (開削管)、マンホールの 5 種類である。普通コンクリート製品に対する IBPM コンクリート製品の CO₂ 排出量の削減率は、製品に僅かに変動するが 75~85% で、概ね 80% 程度である。なお、既往の研究¹⁵⁾では、結合材中のポルトランドセメントの混合割合が、10~30% では、CO₂ 排出量低減率が 60% 以上となることが報告されている。

この中から、ボックスカルバートとヒューム管 (開削管) に着目し、CO₂ 排出量と CO₂ 排出量の削減率を表 7-11 と図 7-6 に示した。その結果、セメントコンクリート製品に対する CO₂ 排出量の削減率は、ボックスカルバートで-75.2%、ヒューム管 (開削管) で-85.2% である。

表 5-28 各種プレキャストコンクリート製品の CO₂ 排出量と IBPM コンクリートの CO₂ 排出量削減率

PCa製品	コンクリートの種別	項目	使用材料						CO ₂ 排出量合計 (kg-CO ₂ /t)	CO ₂ 排出量削減率 (%)
			W	e-CON	OPC	EX	S	G		
ボックスカルバート	e-CON	配合 (t/m ³)	0.116	0.520	0	0.030	0.770	0.959	81.1	75.2
		CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /t)	0.023	52.416	0	22.929	2.233	3.548		
	普通	配合	0.160	0	0.400	0.020	0.810	1.009	327.1	-
		CO ₂ 排出量	0.032	0	305.720	15.286	2.349	3.733		
セグメント	e-CON	配合	0.116	0.520	0	0.030	0.770	0.959	81.1	75.1
		CO ₂ 排出量	0.023	52.416	0	22.929	2.233	3.548		
	普通	配合	0.151	0	0.419	0	0.879	0.963	326.4	-
		CO ₂ 排出量	0.030	0	320.242	0	2.549	3.563		
ヒューム管 (推進管)	e-CON	配合	0.108	0.460	0	0.030	0.895	0.912	75.3	78.0
		CO ₂ 排出量	0.022	46.368	0	22.929	2.596	3.374		
	普通	配合	0.158	0	0.440	0	0.734	1.076	342.4	-
		CO ₂ 排出量	0.032	0	336.292	0	2.129	3.981		
ヒューム管 (開削管)	e-CON	配合	0.114	0.440	0	0	0.747	1.095	50.6	85.2
		CO ₂ 排出量	0.023	44.352	0	0	2.166	4.052		
	普通	配合	0.158	0	0.440	0	0.734	1.076	342.4	-
		CO ₂ 排出量	0.032	0	336.292	0	2.129	3.981		
マンホール	e-CON	配合	0.120	0.400	0	0	0.757	1.111	46.7	86.0
		CO ₂ 排出量	0.024	40.320	0	0	2.195	4.111		
	普通	配合	0.172	0	0.430	0	0.755	0.942	334.4	-
		CO ₂ 排出量	0.034	0	328.649	0	2.190	3.485		

表 5-29 ボックスカルバートとヒューム管（開削管）の CO₂ 排出量削減率

製品名	種別	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /t)	比率 (%)	CO ₂ 排出量削減率 (%)
ボックスカルバート	e-CONコンクリート	81.1	24.8	-75.2
	普通コンクリート	327.1	100	0
ヒューム管 (開削管)	e-CONコンクリート	50.6	14.8	-85.2
	普通コンクリート	342.4	100	0

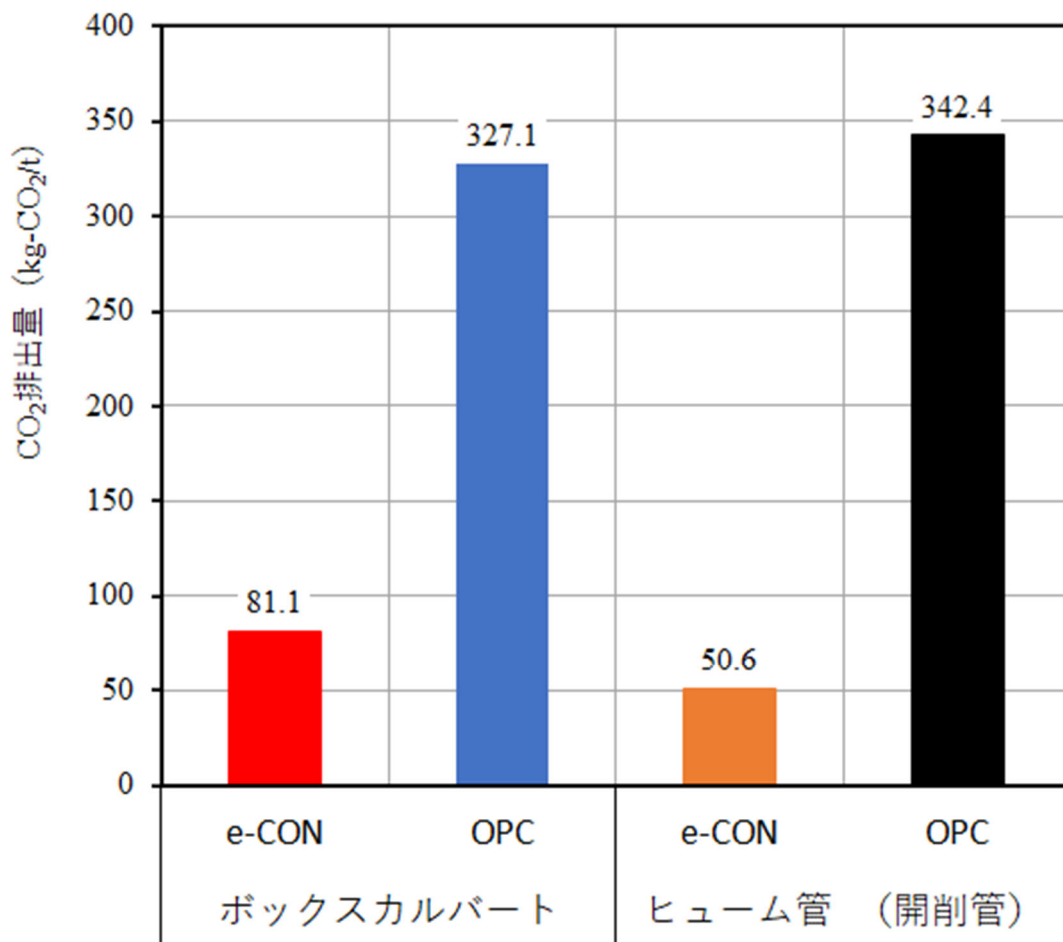


図 5-22 IBPM コンクリートと OPC コンクリートの CO₂ 排出量

5. 1 2 まとめ

- ① IBPM コンクリートは、単位結合材量（粉体量）が多いため粘性が増すことから、スランプフローを 650mm 程度とし、遠心成形の締固めによって、高緻密化と強度増進が得られることを期待した。また、ヒューム管は地下に埋設されるため、凍害の影響を受けないことから、空気量は通常の OPC 製ヒューム管と同じ 2%とした。s/a は OPC 製ヒューム管の製造方法である遠心成形において、広く採用されている 41%を用いた。この時の IBPM コンクリートのフレッシュ性状は、スランプフローが 610mm、空気量は 1.9%であった。
- ② IBPM コンクリートをプレキャスト製品工場の強制練り 2 軸型ミキサで練り混ぜ、IBPM 製ヒューム管（内径 250×長さ 2000 mm）を遠心成形で製造した。また、ヒューム管の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ため、IBPM 製ヒューム管の外圧試験を行って、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。
- ③ 振動締固めおよび遠心力締固めにより、各種 PCa 製品の実物大供試体の試作を行い、打込み、締固め、仕上げに適切なフレッシュ性状を有する IBPM コンクリートの製造が可能であることが確認された。
- ④ IBPM コンクリートを用いた各種 PCa 製品の実物大供試体により载荷試験を行い、各製品の耐荷性能に関する規格を満足することが確認された。
- ⑥ IBPM 製のボックスカルバートに用いた IBPM コンクリートは、圧縮強度の基準値を満足した。また、同製品から採取したコア供試体の圧縮強度は採取位置で僅かに変動が認められたものの、良好な結果が得られた。
- ⑦ IBPM コンクリートの材料特性値は、IBPM 製ボックスカルバートと RC ボックスカルバートは共に基準値を満足し、双方の結果は概ね同等であった。
- ⑧ 外圧試験では、IBPM 製ボックスカルバートと RC ボックスカルバートは共に、下水道協会規格を満足し、ひび割れ荷重と破壊荷重は同等な結果が得られた。
- ⑨ 外圧試験での変位量は、上載荷重に対して両者共に同様な挙動を示した。また、部材に発生した応力も鉄筋のひずみも含めて、同様な傾向にあった。
- ⑩ 上記の結果から、設計基準強度が同じであれば、IBPM ボックスカルバートは RC ボックスカルバートと同様な設計が可能であると考えられる。

- ⑪ 粗度係数を計測するための水理実験を設け、その対象とした下水道管は5種類である。その内はヒューム管（SA 無混入）、粒度調整灰を混入したヒューム管（SA 混入）、IBPM 製ヒューム管、塩化ビニール管のVU管（肉厚管）、塩化ビニール管のVP管（薄肉管）である。
- ⑫ 水理実験の結果、IBPM 製ヒューム管の回帰直線は、塩化ビニール管の回帰直線に近いことが分かった。この結果から、レイノルズ数が概ね $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$ の範囲におけるIBPM 製ヒューム管の粗度係数は、塩化ビニール管の粗度係数である $n=0.009$ とほぼ同等であると考えられる。
- ⑬ IBPM 製ヒューム管の結合材に使用しているフライアッシュは、非晶質の二酸化けい素を主成分とする球状の微粒子であり、シリカフェームは、粒径が $1 \mu\text{m}$ 以下で球状の超微粒子である。このため、遠心成形によってこれらの密度の軽い微粒子が管の内面に集積され、IBPM 製ヒューム管の内面にはガラス質で滑らかな表面テクスチャーが形成されたものと推察する。このことが、IBPM 製ヒューム管の流下性能（粗度係数）の向上に繋がったものと考えられる。
- ⑭ 環境負荷軽減（産業副産物の混入率）
IBPM 結合に混入された産業副産物（FA, BFS, SF）は全体の90%に相当し、残りの10%をアルカリ刺激材であるCH（水酸化カルシウム：消石灰）と、硬化後の収縮低減を目的に混入しているEX（膨張材）で構成している。
- ⑮ 環境負荷軽減効果（脱炭素：CO₂排出量の削減率）
IBPM コンクリート製品のCO₂排出量削減率は、対象製品によって僅かに異なるものの普通コンクリート製品に対して概ね80%である。

参考文献【第5章】

- 5-1) 下水道用鉄筋コンクリート管：JSWASA-1（呼び径 150～3000）公益社団法人日本下水道協会，2011.12
- 5-2) 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,pp1917-1922.2018.6
- 5-3) 畑 実，杉本克美，林 悦朗，宮澤伸吾：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.42,No.1,pp1834-1839.2020.6
- 5-4) 高流動コンクリート施工指針：土木学会コンクリートライブラリー93,1998
- 5-5) 下水道用鉄筋コンクリート製組立てマンホール：JSWASA-11 公益社団法人日本下水道協会,2005
- 5-6) 下水道用鉄筋コンクリート管：JSWASA-1（呼び径 150～3000）公益社団法人日本下水道協会,2011.12
- 5-7) 下水道推進工法用鉄筋コンクリート管：JSWASA-2（呼び径 800～3000）公益社団法人日本下水道協会, 2018.7
- 5-8) 下水道ミニシールド工法用鉄筋コンクリートセグメント：JSWASA-7（呼び径 900～2000）公益社団法人日本下水道協会, 1992.4
- 5-9) 道路土工・カルバート工指針，社団法人日本道路協会, 2010.3
- 5-10) 下水道施設計画・設計指針と解説：前編 2019 年版，pp.287，公益社団法人日本下水道協会，1989.9.26
- 5-11) 高桑哲男：コールブルック・ホワイト公式を使用した管網計算，土木学会論文報告書，第 204 号，pp.51-59,1972.6
- 5-12) 水理公式集 2018 年版，（公社）土木学会，第 4 編水資源と上下水道，pp.505-507,2019.
- 5-13) 米澤敏男，柳橋邦生，池尾陽作，朝倉悦郎：高強度コンクリート中でのシリカフェームの分散状態の研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.15,No.1,pp.69-74.1993.6
- 5-14) 土木学会：混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案）：コンクリートライブラリー152，2018
- 5-15) 溝渕麻子，小林利充，神代泰道，一瀬賢一：混和材を高含有したコンクリートの CO₂ 削減効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.36,No.1,pp118-123,2014

第 6 章 結論

6. 1 各章のまとめ

第1章「序論」では、本研究の背景や既往の研究および本研究の目的について述べると共に、プレキャスト製品として IBPM コンクリートへの要求性能にも言及した。

このうち、IBPM コンクリートの起源としてローマンコンクリートを挙げており、火山灰と火山石に石灰を加え、海水と混合して堅牢な構造物を建造していることや、中国にある万里の長城のモルタルに石灰が使われていたという内容も記述した。火山灰はフライアッシュと類似し、シリカ (SiO_2) とアルミナ (Al_2O_3) 成分を多く含んでおり、これに石灰を加えて水と混合すると、ポゾラン反応によって長期強度が増進する性質を示す。これは、まさに IBPM コンクリートの特性といえるものである。

第2章「IBPM コンクリートの圧縮強度に及ぼす材料と種類および配合の影響」では、IBPM 結合材に使用した各種材料や混合比率、およびアルカリ刺激材の選定に関するモルタル実験について記述した。アルカリ刺激材の選定では、GY (二水石膏)、CH (水酸化カルシウム)、LPS (石灰石微粉末) の3種類をアルカリ刺激材の候補とし、検証を行った。この時、IBPM モルタルの主要材料である FA と BFS の混合比率を 4:6, 5:5, 6:4 として強度発現性を確認した。その結果、IBPM モルタルのアルカリ刺激材として CH を選定し、FA と BFS の混合比率は 5:5 とすることとした。これに伴って、IBPM モルタルにおける SA と CH の最適な混入率を検証した結果、IBPM 結合材に対して、SA は 5%、CH は 4% 混入することを決定した。

IBPM モルタル供試体と OPC モルタル供試体を 5%濃度の硫酸水溶液に 28 日間浸漬した結果、供試体の質量変化率は、IBPM モルタルは殆ど変化が生じなかったが、OPC では-32%に達した。また、IBPM モルタルの凝結時間をプロクター貫入試験で確認した結果、始発が 14 時間、終結が 19 時間であった。これは、FA のポゾラン反応と BFS の潜在水硬性、および SA が含有するリンの影響によって硬化遅延が生じたものと考えられる。IBPM (ペースト) の硬化メカニズムを解明する目的で粉末 X 線回析による分析を行った結果、CSH, Ett, Q, Mu の4種類が同定された。このうち、Ett は EX 由来、Q と Mu は FA 由来と考えられたため、IBPM の硬化は CSH によるものと推察された。フライアッシュの影響では、モルタル試験の結果から、FA の品質変動が IBPM コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響は、OPC に FA を混入する場合と比較して小さく、本研究の対象とした FA の範囲内においては実用上無視できる程度であることが示唆された。

その後、コンクリート実験に移行し、遠心成形と振動成形について IBPM コンクリート強度特性について、蒸気養生 (前置時間) に着目した研究を行った。その結果、遠心成形の有効性を確認した。IBPM, OPC, BB, FC の配合で遠心供試体 (外径 200×長さ 300mm) を作製し、厚さ 50mm の輪切り (リング状) の試験片を採取して、耐硫酸性試験 (5%濃度硫酸水溶液に 112 日間浸漬) を行った結果、質量変化率は、IBPM : -1.5%、OPC : -38.6%、BB : -52.3%、FC : -62.2 となった。4 種類の配合は水結合材比 (W/B) を 31%に統一したことから、IBPM コンクリート供試体は他の配合よりも圧縮強度が 20N/mm^2 以上低いものの、耐硫酸性が優れていることが顕著であった。

次に、IBPM コンクリートの長期強度特性に関する検証を行った。その結果、水中養生では材齢 56 日 (50N/mm^2) 以降も材齢の進行に伴って強度が増進し、材齢 730 日で 68N/mm^2 までに達しており、潜在水硬性やポゾラン反応による効果が得られたものと考えられる。同じく気中養生では材齢 56 日

(42N/mm²) 以降も緩やかな強度増進が僅かに認められたが、材齢 730 日で 44N/mm² 程度であった。これに対して、気中養生の OPC コンクリートは材齢 56 日以降の強度増進は殆ど認められない。

IBPM コンクリートの高強度化では、IBPM コンクリートについて 50N/mm² 以上の高強度化が得られるように、単位水量や水結合材比などの配合条件を大幅に見直した。具体的には、単位水量(W) 120kg/m³ 以下、水結合材比 (W/B) 30%以下、高性能減水剤 (Sp) 添加率 1.2%以上のコンクリートに関する検討結果について記述した。この結果、IBPM コンクリートは圧縮強度が 30~80N/mm² の範囲内において、一般のセメントコンクリートと同様、結合材水比 (B/W) による配合設計が可能であることを示した。

第3章「IBPM コンクリートの耐久性」では、高強度化を図った IBPM コンクリートを中心に耐久性について記述した。この中で、耐久性については、収縮性状（自己収縮、拘束ひび割れ、乾燥収縮）、耐硫酸性、耐塩害性、中性化抵抗性、耐凍結融解抵抗性、すり減り抵抗性に関する研究結果を記述した。

収縮性状において、自己収縮では、OPC コンクリート (W/C=30%) の自己収縮ひずみは 400×10^{-6} 程度であったことが既往の研究で報告されている。これと同等の圧縮強度レベルの IBPM コンクリートの自己収縮ひずみは 340×10^{-6} であることから、自己収縮は OPC コンクリートと同等のレベルにあるといえる。

拘束ひび割れは、各供試体に発生したコンクリートの拘束応力度を図と表に示すように、IBPM 供試体に発生した拘束応力度は材齢 140 日までに 2~3N/mm² 程度であり、他のコンクリートの 70~80%程度であった。一方、曲げ強度に対する引張り強度の割合（曲げ/引張り）では、IBPM は 2.6 程度、OPC と BB は 2.0 程度、FC は 1.7 程度であったことから、IBPM は強度面で最も余裕がある。これは、IBPM に混入した膨張材 (EX) が収縮低減に寄与していることが推察されるが、更なる検証が必要である。

乾燥収縮では、IBPM コンクリート (35.6N/mm²) と OPC コンクリート (35.5N/mm²) の乾燥収縮ひずみは、乾燥期間 180 日で 500×10^{-6} 程度で同等であった。

耐硫酸性では、IBPM コンクリートは成形方法（振動締固め、振動締固め）によらず、OPC コンクリートと比べて 10 倍以上の優れた耐硫酸性を有している。

耐塩害性では、土木学会の「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法 (案)」に準じて算出した塩化物イオンの拡散係数は、IBPM コンクリートが 0.237cm²/年、OPC コンクリートが 1.319cm²/年であり、IBPM コンクリートの拡散係数は OPC コンクリートの約 18%であり著しく小さい値であることが分かった。

中性化抵抗性では、促進中性化試験でのモルタル実験、曝露試験でのモルタルや実験コンクリートにおいても、中性化の進行は総じて OPC よりも IBPM の方が早い。しかし、促進中性化試験結果を基に、実環境における 100 年後の中性化深さを求めると 19.8mm となり、中性化残り 20mm 以下を満足するため、IBPM コンクリートにおいても 100 年間は鉄筋に腐食が発生しないことが推察される。

耐凍結融解抵抗性では、パラフィン系エマルジョンの特殊混和材を用いることによって IBPM コンクリートの耐凍結融解性が著しく改善されることが明らかとなった。

すり減り抵抗性では、IBPM モルタルの摩耗深さは、W の大幅な低減や低 W/B 化によって OPC モルタルよりも小さくなっている。このことから、水路等の流水環境下の構造物への利用を想定した場合、IBPM コンクリートはコンクリートと同等以上の耐摩耗性を有していると考えられる。

電子顕微鏡観察、細孔径分布、環境負荷低減効果、アルカリ骨材反応抑制効果について記述した。

電子顕微鏡観察では、IBPMはOPCに比べて空隙が少なく、緻密な組織であることが確認された。これは、IBPMは単位容積当たりの粉体の空間率が低く、充填性の良い粉体構造となっていることが、蒸気養生直後から優れた強度発現性を示す一因であると考えられる。また、IBPMは長期材齢での強度増進が確認されている。これは、本水和組織観察において、IBPM中の水和物の密度が増加していることが示されたことや、材齢91日においてIBPM中のFAが反応していることが確認されたことから、FAのポズラン反応が寄与しているものと考えられる。

細孔径分布では、IBPMは細孔径分布の幅が狭く、小径側に集中する傾向が見られることから、OPCよりも緻密性が高いことが顕著に表れている。

アルカリ骨材反応抑制効果では、骨材（安山岩）の化学法、3試料「OPC」・「IBPM+N-EX」・「IBPM」の促進膨張試験（モルタルバー法）および実体・偏光顕微鏡観察の結果、以下の結果が得られた。

化学法の結果、骨材（安山岩）は $S_c=573\text{mmol/L}$ 、 $R_c=113\text{mmol/L}$ で、「無害でない」と判定された。また、偏光顕微鏡観察の結果、骨材（安山岩）にはASR反応性鉱物として、急速膨張性（高反応性）のクリストバライトとトリディマイトが確認された。

促進膨張試験（モルタルバー法）の結果、「OPC」は「無害でない」、「IBPM+N-EX」と「IBPM」は「無害」であった。

「OPC」の偏光顕微鏡観察の結果、安山岩（骨材）からセメントペーストに進展したひび割れが確認され、さらに、セメントペースト中にも高密度にひび割れが生成していた。したがって、ASRの劣化進行度は中程度～顕著（加速期）と判定された。

「IBPM+N-EX」と「IBPM」の偏光顕微鏡観察の結果、安山岩（骨材）にASRによるひび割れの形成は確認されなかった。したがって、ASRの劣化進行度は軽微（潜伏期）と判定された。いずれにおいても、膨張材の水和膨張によるひび割れは確認されなかった。

以上の結果から、IBPMを結合材に用いたモルタルのASR抑制効果が非常に高いことが、促進膨張試験および偏光顕微鏡による組織観察からも確認された。

第4章「RC構造体としての曲げ耐力と変形性能」では、プレキャスト製品工場においてIBPMコンクリート製のRC梁を製造し、静的曲げ載荷試験を行って部材としての応力照査を行い、普通コンクリート（OPC）製のRC梁との違いについて検証した。IBPMコンクリートとOPCコンクリートの諸性状は、圧縮強度、引張強度、曲げ強度、ポアソン比、および静弾性係数においてほぼ同等であった。その結果、両者は同等の曲げ耐荷性能と変形性能を有していることを確認した。

第5章「プレキャストコンクリート製品への適用」では、ヒューム管（開削管）に用いたIBPMコンクリートのフレッシュ性状は、スランプフロー610mm、空気量1.9%、圧縮強度は材齢28日で 42N/mm^2 が得られた。当該コンクリートを用いてヒューム管（開削管）を試作して外圧試験を行った結果、規格荷重（ひび割れ荷重、破壊荷重）を十分に満足した。

IBPMコンクリートを実際にプレキャストコンクリート製品に適用し、その品質を評価した。プレキャストコンクリート製品の種類は、ボックスカルバート、セグメント（コンパクトセグメント）、ヒューム管（開削管、推進管）、マンホールの5種類であり、そのすべてにおいて品質規格を満足した。なお、

設計基準強度に対して実際の PCa 製品の強度に余裕のある製品が認められるため、この点については微調整が必要である。

外圧試験に用いた IBPM 製ヒューム管（開削管）と並行して試作した同製品の流水性能（粗度係数）を計測するために、大規模な水理実験装置を設け、水が満管状態で流下する条件で測定した。本測定の比較対象は、ヒューム管（SA 無混入）、ヒューム管（SA 混入）、塩化ビニール管（VU）、塩化ビニール管（VP）、IBPM 製ヒューム管の全 5 種類とした。その結果、流速が 0.6m/s～3.0m/s におけるレイノルズ数と粗度係数の相関から、IBPM 製ヒューム管の流水性能（粗度係数）は塩化ビニール管の粗度係数（ $n=0.009$ ）とほぼ同等であると考えられる。これは、IBPM 結合材に用いられている FA と SF がガラス質の微粒子であり、遠心成形によって管の内面に集積されて滑らかな表面テクスチャーが形成されたものと推察する。

環境負荷低減効果では、産業副産物は、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、シリカフェームの 3 種類で、IBPM 結合材の 90%を占める。また、セメントコンクリート製品に対する CO₂ 排出量の削減率は、ボックスカルバートで-75.2%、ヒューム管（開削管）で-85.2%である。

第 6 章「結論」では、各章のまとめと今後の課題や展望について記述すると共に、本研究によって確認された IBPM コンクリートの特性や有効性について示した。

6. 2 今後の課題と展望

今後の課題と展望として、以下の項目が挙げられる。

- (1) 地球の温暖化は、気候変動による未曾有の大災害をもたらし、台風の大型化、線状降水帯による局地的な集中豪雨、河川の氾濫、土砂災害、気温上昇による北極・南極の氷山や氷河の融解に伴う海水面の上昇、山火事、干ばつなど、その影響は多岐にわたる。

このように、地球の環境問題が深刻化しているため、社会の持続可能性を実現するために「脱炭素社会」、「循環型社会」、「自然共生社会」の構築は、すべての分野において重要な課題となっている。社会資本の整備や次世代への継承を担う建設分野においても、インフラ・設備・構造物のライフサイクルの中で、「循環型社会」を構築していくことは、地球環境問題の克服と持続可能な社会基盤整備を実現するためには不可欠である。

IBPM コンクリートは、結合材の90%が産業副産物であり、セメントコンクリートよりもCO₂排出量を約80%削減できる。今後は、更に脱炭素化に向けて加速し、「カーボンニュートラル」や「カーボンクレジット」を実現して、IBPM コンクリートのグレードアップを図ることが求められる。

- (2) 我が国では、高度経済成長期以降に整備されたインフラが、今後一斉に老朽化することが懸念されている。このように老朽化するインフラを計画的に維持管理・更新することで、国民の安全・安心の確保、維持管理・更新に係るトータルコストの削減を図ることが可能となる。

維持管理は従来のセメントコンクリートの対象となるが、IBPM コンクリートが更新（打ち替え）や新設の対象となるように、IBPM 結合材（パウダー）の供給体制やIBPM コンクリート製PCa製品の生産体制を構築しておく必要がある。

- (3) 現代のインフラ整備において、コンクリートには100年の高耐久性が求められる時代になっている。本研究で明らかになったように、IBPM コンクリートは従来のセメントコンクリートに比べて高耐久性であることを述べた。特に、耐硫酸性は10倍以上、耐塩害性は5倍以上の耐久性を有するため、IBPM コンクリートはセメントコンクリートよりもライフサイクルコストが低く抑えられるものと考えられる。

なお、IBPM コンクリートの中性化については検討の余地が残されているため、中性化と鉄筋の腐食との因果関係の解明も含めた研究が必須である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、御指導、御教示を賜わり、本論文をまとめる機会をお与え頂いた足利大学創成工学科教授工学博士・宮澤伸吾先生に深厚なる謝意を表します。

本論文の副査としてご指導頂きました足利大学名誉教授工学博士・横室隆先生，足利大学学長工学博士・末武義崇先生，足利大学工学部創生工学科教授工学博士・齊藤宏昭先生，群馬大学大学院理工学府物質環境類土木環境プログラム教授工学博士・小澤満津雄先生には深謝申し上げます。

島根大学学術研究院環境システム科学系助教農学博士・上野和広先生，島根大学農学部生命環境農学科農学博士・緒方英彦先生には摩耗試験においてご指導を頂きました。ここに深謝申し上げます。日本スプライススリーブ(株)・宮澤祐介博士には細孔径分布の測定において御指導とご助言を頂きました。

また、本論文の執筆にあたり貴重な示唆を頂いた(株)太平洋コンサルタント技術調査室長・沢木大介博士，分析に際しご協力を頂いた(株)太平洋コンサルタント野口康成博士，広野真一博士，向井浩三氏，塚本師子氏，高橋晴香氏，安藤陽子博士，高橋英孝氏に厚く御礼申し上げます。

本研究を進める上で貴重な資料の提供を頂きました太平洋セメント(株)・早川隆之氏，太平洋マテリアル(株)・長塩靖祐博士，宮地貞憲氏，(株)デイ・シイ・藤原了博士，秩父コンクリート工業(株)・田中秀和氏，東京コンクリート工業(株)・海老信裕氏には大変お世話になりました。

本研究の壮大なビジョンと開発目標をご指導下さいました東京都下水道サービス(株)・岩佐行利顧問には深謝申し上げます。また，共同研究者として御指導を賜りました東京都下水道サービス(株)高橋良文顧問，佐藤誠氏，岡留孝一氏，杉本克美氏，林悦朗氏，谷津清宏氏，日本工営(株)・貝塚和彦氏の皆様には感謝申し上げます。

日本ヒューム(株)・田中敏嗣博士，古谷彰浩氏，野本禎久氏，渡邊隆信氏，田口拓望氏，南澤聡氏，早野博幸博士，井川秀樹博士，秋元昌哲氏，江口秀男氏に感謝の意を表します。特に，井川秀樹博士には，研究の後押しと報告書作成にあたってご配慮して頂き，ここに深く感謝致します。

最後に，本研究を進めるに当たり，サポートしてくれた家族に心から感謝致します。

本論文は，本当に多くの方々の御指導と御協力，御支援が有って作成できたものです。改めて感謝の意を表し，謝辞と致します。

2023年3月