

# 論文 水ガラスが付着した鋳物廃砂のコンクリート細骨材としての利用に関する基礎的研究

周藤 将司\*1・宍道 亮太\*2・別所 啓一\*3・吉岡 眞一郎\*4

**要旨:** 本研究では、産業廃棄物である鋳物廃砂のコンクリート用骨材としての利用の可能性についての検討をモルタルによって行った。鋳物廃砂は、粒度の粗い砂と組み合わせて利用することで、十分に利用可能であることが確認された。また、鋳物廃砂の性質上、表面に水ガラスが付着していることが避けられず、水ガラスに起因する膨張が懸念される。この点については、細骨材に対する鋳物廃砂の置換率を制限することや、鋳物廃砂表面に付着した水ガラスを除去するなどの処理を行うことで対策可能であることが確認された。また、膨張抑制については、蒸気養生やフライアッシュの混用による効果も確認された。

**キーワード:** 鋳物廃砂, 鋳物砂, 産業廃棄物, 未利用資源, 粗粒率, ASR, モルタルバー法

## 1. はじめに

鋳造は、金属加工方法の一種であり、鋳型に熔融状態の鉄を流し込んで目的の形状の鋳物を作製する製鉄方法である。鋳型に用いる砂は、JIS G 5901:2016「鋳型用けい砂」によって規定されている。けい砂の粒度区分は11種類に区分けされており、実務的には複数種類の粒度区分のけい砂を適宜混合して用いられている。鋳物砂は、このけい砂に粘結剤などを添加したものである。一般的に鋳物砂は繰返し使用されるが、定期的に新しい砂を混合するため、一定量が余剰分となり、鋳物廃砂として廃棄される。

経済産業省の策定するガイドライン<sup>1)</sup>において、鋳物廃砂はコンクリート用骨材や粘性土の改良材などとしての再利用が推進されている。過去には、鋳物廃砂をコンクリート魚礁の材料として使用する研究<sup>2) 3)</sup>や、レンガ原料に使用する研究<sup>4)</sup>が行われているが、再利用に関する研究事例は多くないのが実情である。現在、鋳物廃砂はセメント原料や路盤材として再利用されている<sup>5)</sup>ものの、その多くは産業廃棄物として処理されており、再利用方法が明確に確立されているとは言えない現状である。

鋳物廃砂は、元来けい砂であるため、コンクリート用骨材として利用できる可能性は、十分に考えられる。骨材としての研究や利用が進んでいない理由として、添加物が混合されていることや、そもそもの材料特性が認知されていないことが挙げられる。鋳物廃砂の特徴としては、一般的なコンクリート用細骨材と比較して、粗粒率が小さいことが挙げられる。また、粘結剤に水ガラスが用いられる場合は、水ガラスのアルカリ分に起因するASRによる膨張が生じることが知られている<sup>2) 6)</sup>。しか

し、ベシマム現象の有無などの膨張特性については、明らかにされていない。

そこで、本研究では鋳物砂の廃棄分である鋳物廃砂を、コンクリート用細骨材として利用する際の基礎資料となるデータを得ることを目的として、水ガラスを含む鋳物廃砂を細骨材置換したモルタルについて試験を実施した。具体的には、フレッシュ状態の流動性と空気連行性、硬化後の強度特性と膨張特性について検討を行った。さらに、膨張特性を明らかにした上で、膨張抑制対策について検討を行った。

## 2. 鋳物廃砂の特徴

本研究で用いた鋳物廃砂は、JISで規定される鋳型用けい砂(4号, 4.5号, 5号の混合砂)に水ガラスを5%, シリコンパウダーを2%添加して鋳造に用いられた後の廃砂である。鋳物廃砂の色は黒色である。これはシリコンパウダーの黒色が支配的であるためである。鋳物廃砂について環境庁告示46号溶出試験を実施したところ、いずれの測定項目においても基準値以下の値を示した。この結果より、鋳物廃砂は、有害物質の含有量・溶出量について基準を満たす材料であることが確認された。

次に、鋳物廃砂の物理的性質を把握するため、密度・吸水率試験(JIS A 1109に準拠)、ふるい分け試験(JIS A 1102に準拠)を実施した。その結果、表乾密度は2.81g/cm<sup>3</sup>、絶乾密度は2.79g/cm<sup>3</sup>、吸水率は1.0%であった。ふるい分け試験結果について、粒度分布を図-1に示す。図中の一点破線は、土木学会の示す細骨材の粒度の標準<sup>7)</sup>から作図したものである。鋳物廃砂は、粒径が0.6mm未満のものが大半を占めており、標準粒度曲線からは外れて

\*1 松江工業高等専門学校 環境・建設工学科准教授 博士(農学) (正会員)

\*2 松江工業高等専門学校 専攻科 生産・建設システム工学専攻

\*3 日本ハイコン株式会社 品質管理課 検査係 課長

\*4 米子製鋼株式会社 代表取締役社長

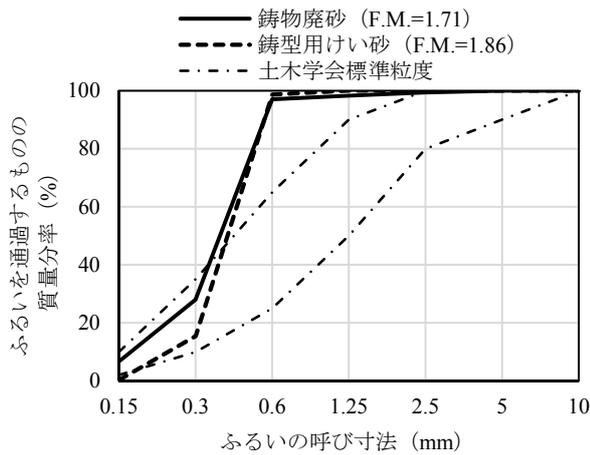


図-1 鑄物廃砂の粒度分布

いることが分かる。また、0.6mm ふるいを通過し、0.3mm ふるいに留まる試料は、全体の69%存在する。前記の標準<sup>7)</sup>では、「連続したふるいの中の量の差は45%を超えないのが望ましい」とされており、鑄物廃砂はこの値を越えている。これらのことから、鑄物廃砂を単独で細骨材として用いてコンクリートを作製することは難しいことが示唆された。なお、粒径0.075 $\mu$ m未満の微粒分は1%であり、コンクリートの品質に微粒分量が影響することはないと考える。

図中で破線によって示される鑄型用けい砂は、水ガラスとシリコンパウダーを添加する前の状態に対する試験結果である。鑄物廃砂の粗粒率(F.M.=1.71)は、鑄型用けい砂の粗粒率(F.M.=1.86)と比較して小さくなる結果を示した。これは、シリコンパウダーの添加と、繰返し使用した際の砂同士の摩耗によって、細粒分がやや増加したことに起因していると考えられる。

### 3. モルタルのフレッシュ性状、強度特性

#### 3.1 試験概要

本試験で用いたセメント(C)は普通ポルトランドセメント(密度3.14g/cm<sup>3</sup>)、水(W)は上水である。細骨材(S)には、島根県仁多郡奥出雲町産加工砂(表乾密度2.57g/cm<sup>3</sup>、吸水率1.30%、粗粒率3.11)を表乾状態で用いた。鑄物廃砂(FS; Foundry waste Sand)は、前章で示した材料を気乾状態で用いた。これは、鑄物廃砂をコンクリート用骨材として使用する場合には、排出されたままの状態、つまり気乾状態で使用する可能性が高いことを考慮しているためである。なお、本試験で用いた鑄物廃砂の気乾含水率は、概ね0.2%程度であった。

表-1に配合表を示す。モルタルの基本配合は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠し、W/C=50%、セメント骨材比を1:3とした。鑄物廃砂は、細骨材に対して0~100%まで10%刻みで質量置換した。

モルタルは、モルタルミキサー(容量10L)を用いて

表-1 配合表

FS 置換率 (%)	質量 (g)			
	W	C	S	FS
0	225	450	1350	0
10			1215	135
20			1080	270
30			945	405
40			810	540
50			675	675
60			540	810
70			405	945
80			270	1080
90			135	1215
100			0	1350

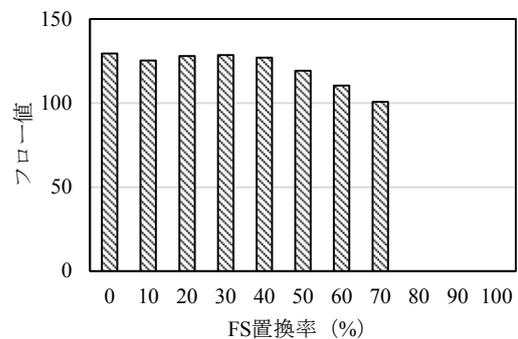


図-2 鑄物廃砂置換率とフロー値の関係

練混ぜ、その後フレッシュ性状の測定と供試体の作製を行った。フレッシュ性状については、フロー値と連行空気量の測定を行った。フロー値は、JIS R 5201に準拠し、空気量は容量500mlのモルタルエアメーターを用いて、それぞれ測定した。

供試体は、打設の翌日脱型して水中養生を開始した。圧縮強度試験は、材齢7, 28, 91日で行った。なお、供試体の作製と強度試験もJIS R 5201に準拠して行った。

#### 3.2 結果と考察

図-2に鑄物廃砂置換率とフロー値の関係を示す。フロー値は、FS 40%程度までは、ほぼ一定の値を示しており、40%を超えると置換率の増加に応じてフロー値が低下する傾向を示した。また、置換率80%以上では、フローコーンを持ち上げた際にモルタルが崩れ、測定を行うことができなかった。これより、鑄物廃砂を細骨材として全置換して用いることは難しいことが確認された。

図-3に鑄物廃砂置換率と連行空気量の関係を示す。フロー値の傾向と同様に、置換率40%程度まではほぼ一定の値を示した。40%を超えると空気量が増加した。これは、モルタルの流動性が低下し、練混ぜ時に多くの空気を連行してしまったためである。

ここで、図-4に、鑄物廃砂置換率ごとの骨材全体の粒度分布を示している。土木学会の示す標準粒度曲線に

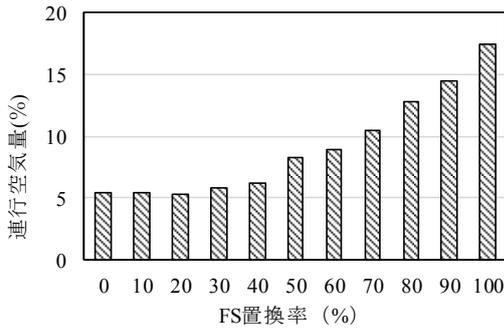


図-3 鋳物廃砂置換率と連行空気量の関係

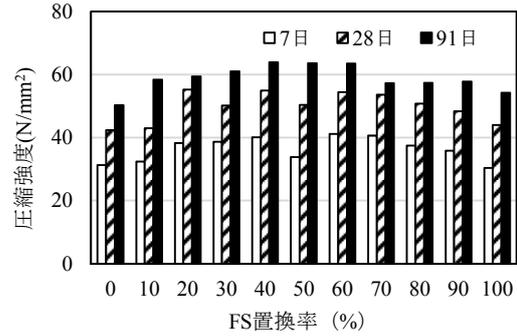


図-5 鋳物廃砂置換率と圧縮強度の関係

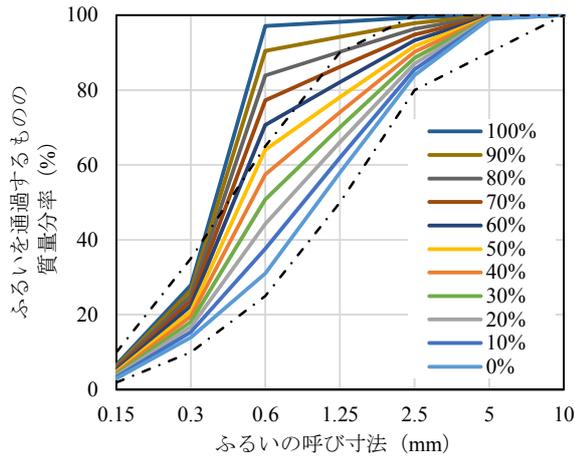


図-4 鋳物廃砂置換率ごとの骨材全体の粒度分布  
(一点破線は、土木学会標準粒度)

収まるのは、置換率が50%までのときである。なお、鋳物廃砂置換率40%のときの粗粒率は2.55であり、50%のときは2.41、60%のときは2.27であった。本試験においてフレッシュ性状は、置換率40%まではあまり変化しないことが確認されている。置換率が40%を超えてからフレッシュ性状に変化が生じた要因として、有効吸水量を有する鋳物廃砂の分量が増えたことで、練混ぜ水を鋳物廃砂が吸水したことが挙げられる。加えて、粗粒率が小さくなることが挙げられる。これらの試験結果より、粗粒率の小さい鋳物廃砂は、粗粒率の比較的大きな細骨材と組合わせて標準粒度曲線に収まるように調整することで、十分に利用可能であるといえる。

図-5に鋳物廃砂置換率と圧縮強度の関係を示す。なお、置換率80%以上のモルタルは、テーブルバイブレーターで振動を加えながらスペーシングを行って成型した。硬化後の供試体に、充填不良の箇所は確認されなかった。圧縮強度は、置換率40%程度でピークを迎え、その前後では緩やかな弧を描くような形で低下することがわかる。ここで、Leらは、一部の粒径を取除いた細骨材を用いたモルタル試験において、細骨材の粒度の違いは圧縮強度に大きな影響を及ぼさないことを明らかにしており<sup>8)</sup>、本試験の傾向とは異なる結果を示している。このことについて、既往研究では粗粒率は2.69~3.10の範囲で試験が

表-2 配合表(モルタルバー法)

FS 置換率 (%)	質量 (g)			
	W + NaOH	C	S	FS
0	300	600	1350	0
10			1215	135
20			1080	270
30			945	405
40			810	540
50			675	675
60			540	810
70			405	945
80			270	1080
90			135	1215
100			0	1350

行われている。それに対して、本研究では粗粒率が1.71~3.11の範囲を取り扱っており、粗粒率の範囲が広がったことで、圧縮強度にも差が生じたものと考えられる。

ここまでの試験結果より、鋳物廃砂の置換率は40%程度までであればモルタルに与える影響が少なく、十分に利用可能であることが明らかになった。

#### 4. モルタルの膨張特性

##### 4.1 試験概要

膨張性については、まず、鋳型用けい砂自体に膨張性がないことを確認するために、JIS A 1804「コンクリート生産工程管理用試験方法—骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(迅速法)」に準拠した試験を行った。ただし、標準砂は用いず、骨材は試料の骨材を全量用いた。試料の骨材は、鋳型用けい砂(未使用)と鋳物廃砂である。

長さ変化率による評価を行ったところ、鋳型用けい砂は「無害」と判定され、鋳物廃砂は「無害でない」と判定された。この結果より、鋳型用けい砂自体には、膨張性がないことが確認された。

続いて、JIS A 1146「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)」に準拠した詳細な検討を行った。試験で使用したセメントは、全アルカリ量が0.48%、酸化ナトリウムと酸化カリウムとの比率が1.4であった。

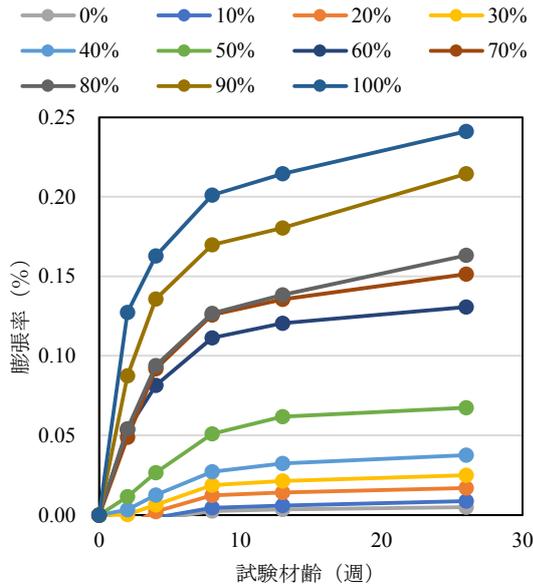


図-6 鑄物廃砂置換率と膨張率の関係

配合は表-2 に示すとおりであり、3 章と同様に鑄物廃砂を 10%刻みで置換した。NaOH はセメントの全アルカリ量が 1.2%となるように計算して加えた。供試体の貯蔵は、40℃、95%R.H.に保持した恒温恒湿器で行った。

#### 4.2 結果と考察

図-6 に鑄物廃砂置換率と膨張率の関係を示す。膨張率は、置換率が增大するごとに大きくなるのがわかる。このことから、本試験で用いた細骨材と鑄物廃砂の組合せには、混入率ペシマムは存在しないと言える。

材齢 26 週における膨張率について、閾値である 0.100%未満となるのは、置換率 50%までであることが確認された。置換率が 60%以上の配合では、膨張率が 0.100%を超えており、鑄物廃砂を高置換率で用いてコンクリートを製造する場合には、何らかの膨張抑制対策を講じる必要があることが明らかになった。

### 5. 鑄物廃砂の処理による流動性と膨張特性の変化

#### 5.1 試験概要

4 章では、鑄物廃砂を排出されたままの状態である気乾状態で用いた。その結果、置換率を増大させた場合の流動性の低下が顕著であったことと、置換率 60%以上では膨張抑制が必要なことが課題として挙げられた。そこで、これらの課題を解決することを目的として、ここでは鑄物廃砂を表乾状態にして用いる検討を行った。骨材の状態以外の試験条件は、3 章、4 章と同一である。

流動性については、鑄物廃砂の有効吸水率が 0%になることから、練混ぜ時の練混ぜ水の吸収という流動性を低下させる要因を一つ解消することができる。膨張抑制については、以下の効果が期待される。すなわち、表乾状態の試料は、水に浸した状態で 24 時間以上吸水させた

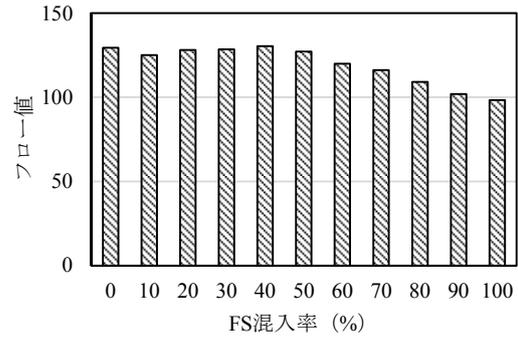


図-7 鑄物廃砂置換率とフロー値の関係 (鑄物廃砂表乾)

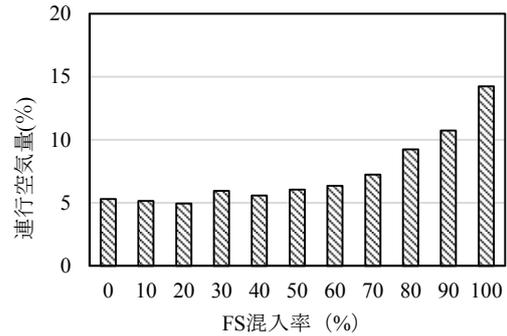


図-8 鑄物廃砂置換率と連行空気量の関係 (鑄物廃砂表乾)

後に、骨材表面を自然乾燥させて作製する。骨材を浸水させる際に、鑄物廃砂表面に付着している水ガラスが水分中に溶出することにより、膨張率も小さくなるのが期待される。ここで、水が 300g 入ったビーカーに鑄物廃砂を 200g 投入すると、pH 値が 7.5 から 10.4 に上昇することが確認されており、この pH 値の上昇は水ガラスの溶出によるものと考えられる。

#### 5.2 結果と考察

図-7 に鑄物廃砂置換率とフロー値の関係を示す。置換率が 30%までは、図-2 の気乾状態の鑄物廃砂を用いた場合とほぼ同等の値を示した。置換率が 40%以上になると、表乾状態の鑄物廃砂を用いたモルタルのフロー値が高くなり、置換率が増大するほどその傾向は明らかになった。ここで混入率 100%のときフロー値は、98mm であり、0%に対する比は 79%であった。これは、気乾状態の鑄物廃砂置換率 70%のときの比と同等である。鑄物廃砂を表乾状態で用いることで、流動性が改善されることが本試験によって確認された。

図-8 に鑄物廃砂置換率と連行空気量の関係を示す。フロー値と同様に、置換率 30%までは、図-3 の気乾状態の鑄物廃砂を用いた場合とほぼ同等の値を示した。置換率が 40%以上になると、図-8 の表乾状態の鑄物廃砂を用いたモルタルの方が空気量が少なくなった。これは、流動性の向上によってモルタルのパスつきが低下し、空気の巻き込みが少なくなったためだと考えられる。

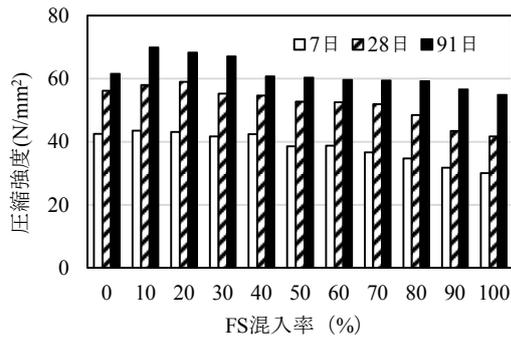


図-9 鋳物廃砂置換率と圧縮強度の関係  
(鋳物廃砂表乾)

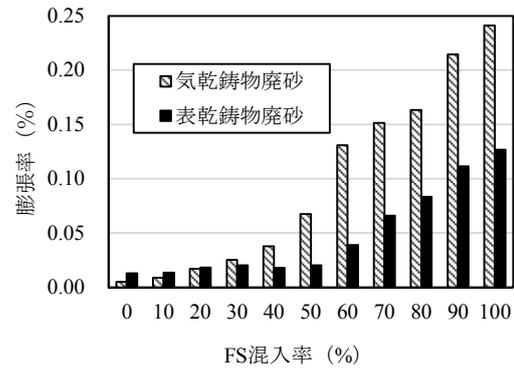


図-11 材齢 26 週における膨張率の比較  
(鋳物廃砂表乾)

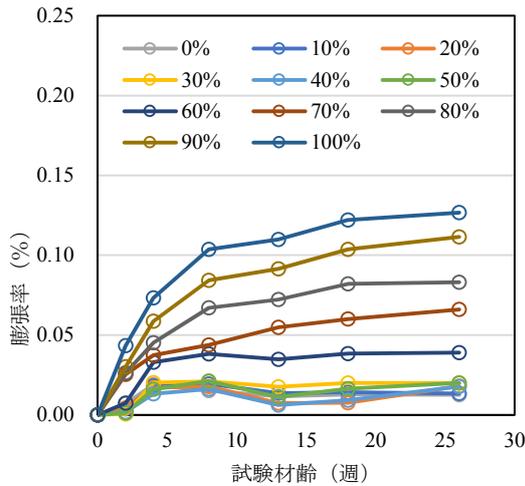


図-10 鋳物廃砂置換率と膨張率の関係  
(鋳物廃砂表乾)

図-9 に鋳物廃砂置換率と圧縮強度の関係を示す。図-5 の気乾状態の鋳物廃砂を用いた場合と比較すると、低置換率での強度は表乾状態の方がやや高くなっているものの、全体としては圧縮強度に大きな差は生じていないと言える。ここで、気乾状態の鋳物廃砂を用いた場合は、鋳物廃砂が練混ぜ水を吸水することで実質の水セメント比は、やや低減していると考えられる。したがって、気乾状態で用いた方が強度は高くなると予測される。一方で、気乾状態では連行空気量が多くなる傾向があり、空気量の増加による強度低下が生じる。水セメント比の低減と連行空気量の増大が、双方の効果を相殺し合った結果として、気乾状態と表乾状態の圧縮強度が同等の値を示したと考えられる。

図-10 に鋳物廃砂置換率と膨張率の関係を示す。また、図-11 に材齢 26 週における表乾・気乾双方の状態の膨張率を示す。表乾状態にした鋳物廃砂を用いることで、膨張率は大幅に低減され、置換率 80% までは、膨張率 0.100% の範囲に収まることが確認された。これは、当初の狙い通り、鋳物廃砂表面の水ガラスが溶出して除去されたことによるものと考えられる。

表-3 配合表

配合名	質量 (g)			
	W + NaOH	C	FS	FA
Cont.	300	600	1350	0
外 10			1278	60
外 20			1207	120
外 30			1135	180

## 6. 蒸気養生・混和材による膨張抑制効果

### 6.1 試験概要

5 章では、水ガラスの除去による各種の効果が確認された。ここで、鋳物廃砂を大量に使用することを考えた場合、時間的・費用的な面からは特別な処理をすることなく使用できることが望ましいと言える。既往の研究として、吉野らは、高炉セメントを用いることで膨張が抑制できることを示している<sup>2)</sup>。また、高田ら<sup>6)</sup>や森脇ら<sup>9)</sup>は、バイオシリカを混用することで鋳物廃砂の膨張を抑制できることを示している。そこで、本研究では、既往の研究とは別の方法・材料での膨張抑制効果について確認することとした。

配合を表-3 に示す。骨材となる鋳物廃砂は 4 章と同様に気乾状態で用い、NaOH はセメントの全アルカリ量が 1.2% となるように計算して加えた。Cont. は、表-2 と同配合ではあるが、別途モルタルを作製して試験している。ここではコンクリート二次製品への適応を考えて、まず、Cont. の配合について、蒸気養生の効果を確認した。蒸気養生は、60℃、95% R.H. に保持した恒温恒湿器内で 4 時間実施し、翌日に脱型した。その他の試験条件は、4 章で示したものと同一である。その後、セメント外割りでフライアッシュ (FA; JIS II 種相当品) を 10, 20, 30% 置換したモルタルに蒸気養生を施した供試体で長さ変化率の測定を行った。なお、試験の都合上、最終の測長を材齢 24 週に行った。

### 6.2 結果と考察

図-12 に膨張率の測定結果を示す。まず、Cont. の促

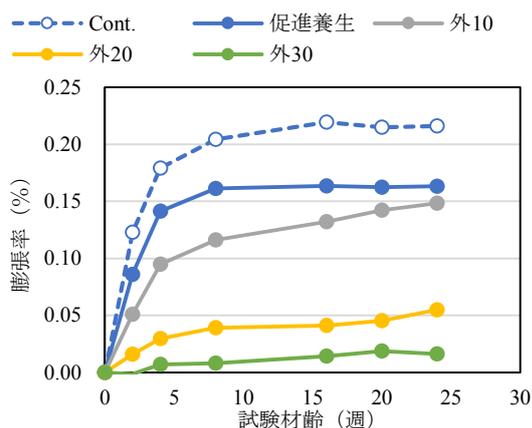


図-12 膨張抑制効果の検討結果

進養生の有無による膨張率の違いについては、促進養生には、膨張抑制効果が認められるが、モルタルパー法の閾値を満足するまでの効果は確認されなかった。次に、FAを外割りで置換した際の膨張率については、10%置換では閾値を上回る結果となった。しかし、20、30%と置換率を増やすことで基準値を下回る膨張率となることが確認された。

本試験では、24週で試験を終了しているが、FAを20%以上混和して蒸気養生を施すことで、JISの測定方法で“無害”と判定できると考えられる。これらの結果より、鋳物廃砂の膨張抑制については、一般にASRによる膨張を抑制する効果があるといわれている対策が有効であることが明らかになった。

## 7. まとめ

本研究によって得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 鋳物廃砂は細骨材として全量置換して用いることは難しい。これは、鋳物廃砂の粒度分布に偏りがあり、また、粗粒率も小さいためである。しかし、ベースとなる細骨材と混用し、土木学会が定める標準粒度曲線の範囲内に収まるように粒度分布を調整することで、利用が可能である。
- (2) 本試験で用いた粗粒率 3.11 の細骨材と鋳物廃砂を組合わせて用いる場合、鋳物廃砂の置換率は 40% 程度までであれば、フレッシュ性状や圧縮強度に与える影響が少なく、骨材として利用可能である。なお、置換率 40% は、標準粒度曲線の範囲内である。
- (3) 鋳物廃砂は膨張性を有する材料である。しかし、細骨材としての置換率が 50% までであれば、無害と判定される膨張率で留まる。また、混入率に起因するペシマム現象は生じない。
- (4) (2), (3) より、現段階における現実的な置換率の上限は 40% 程度であると言える。
- (5) 鋳物廃砂の膨張抑制対策として、鋳物廃砂を表乾状

態で用いることの効果が認められた。これは、鋳物廃砂を水に浸して吸水させる際に、鋳物廃砂表面に付着している水ガラスが溶出して除去されるためである。

- (6) その他の膨張抑制対策として、促進養生の実施やフライアッシュの混用が有効であり、一般的な膨張抑制対策を施すことで効果が得られる。

## 謝辞

本研究の計画・遂行にあたり、鳥取県産業振興機構の岩山悟氏、松江工業高等専門学校名誉教授の高田龍一氏に多大なるご協力をいただいた。また、同校コンクリート研究室の卒業生諸氏には実験の遂行に尽力いただいた。ここに記して深謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 産業構造審議会：品目別・業種別廃棄物処理・リサイクルガイドライン，経済産業省産業技術環境局，pp.16-18，2003
- 2) 吉野公，黒田保，吉岡真一郎，松原雄平：鋳物廃砂を用いたコンクリート漁礁に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.35，No.1，pp.1555-1560，2013.7
- 3) 吉野公，黒田保，鳥羽功，松原雄平：製鋼スラグ骨材と鋳物廃砂を用いたコンクリート漁礁に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.36，No.1，pp.1822-1827，2014.7
- 4) 堀川弘善，皿井博美，名雪東彦：鋳物廃砂の利用に関する調査研究，北海道立工業試験場報告，No.294，pp.33-40，1995.8
- 5) 村川悟，柴田周治，西尾憲行：鋳造工場から排出される廃砂の有効利用に関する調査，平成 13 年度三重県科学技術振興センター工業研究部研究報告，No.26，pp.47-52，2002.2
- 6) 高田龍一，柴田俊文，野中資博：製鋼鋳物砂を活用したコンクリート二次製品の開発に関する研究，平成 25 年度 農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp.754-755，2013.9
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】，pp.45-51，2017
- 8) Le Quang Nhut，取違剛，三宅淳一，松下博通：細骨材の粒度がモルタルの流動性・強度に及ぼす影響，コンクリート工学論文集，Vol.27，No.1，pp.61-66，2005.7
- 9) 森脇慶幸，周藤将司，梅田純子，道浦吉貞：バイオシリカのコンクリート混和材としての利用に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.39，No.1，pp.145-150，2017.7