

電気炉酸化スラグ細骨材や混和材の種類が
粉体系高流動コンクリートおよびモルタルに
及ぼす影響に関する研究

2020年3月

横山 卓哉

目 次

第1章 序論

1.1 本研究の背景	1
1.1.1 電気炉酸化スラグを取り巻く現状と課題	1
1.1.2 フライアッシュを取り巻く現状と課題	1
1.1.3 高流動コンクリートを取り巻く現状と課題	2
1.2 本研究の目的	3

第2章 既往の研究

2.1 調査結果	5
2.2 研究事例報告	6
2.2.1 電気炉酸化スラグ	6
2.2.2 フライアッシュ	9
2.2.3 高流動コンクリート	11
2.2.4 表面気泡	13

第3章 電気炉酸化スラグ細骨材とフライアッシュを用いた粉体系高流動コンクリートに関する基礎的性状評価

3.1 はじめに	18
3.2 実験概要	18
3.2.1 使用材料および特性	18
3.2.2 配合要因	20
3.2.3 コンクリートの練混ぜ方法	20
3.2.4 試験項目および方法	22
3.3 実験結果および考察	23
3.3.1 フレッシュコンクリートの性状	23
3.3.2 硬化コンクリートの性状	34

第4章 混和材の種類が粉体系高流動モルタルの塑性粘度に与える影響評価

4.1 はじめに	42
4.2 実験概要	42
4.2.1 使用材料および特性	42
4.2.2 配合要因	43
4.2.3 モルタルの練混ぜ方法	43

4.2.4	試験項目および方法	43
4.3	実験結果および考察	46
4.3.1	配合要因別評価	46
4.3.2	各指標相互評価	49
4.4	粉体系高流動コンクリートの試し練りに対する手法の提案	51

第5章 結論

5.1	本研究の結論	52
5.1.1	電気炉酸化スラグ細骨材とフライアッシュを用いた粉体系高流動コンクリートに関する基礎的性状評価（第3章）	52
5.1.2	混和材の種類が粉体系高流動モルタルの塑性粘度に与える影響評価（第4章）	53
5.2	今後の展望	53
5.2.1	電気炉酸化スラグ細骨材	53
5.2.2	高流動モルタルの塑性粘度	54

参考文献	56
------	----

第1章 序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 電気炉酸化スラグを取り巻く現状と課題

近年、環境問題への意識の高まりの中で、副産資源の有効活用や天然骨材の枯渇、骨材採取による環境破壊防止の観点から、電気炉酸化スラグは環境負荷を低減させる材料として高く評価されている。電気炉酸化スラグは、回収された鉄スクラップを電気炉で精錬し、鉄筋、形鋼等の素材としての粗鋼を製造する際に副産されるもので、製鋼過程の原料酸化期に排出される。2003年にはJISA 5011-4「コンクリート用スラグ骨材—第4部：電気炉酸化スラグ骨材」が制定され、土木学会より「電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針（案）」¹⁾も示されている。また、2005年にはグリーン購入法に基づく特定調達品目に指定されており、コンクリート用骨材としての利用拡大が期待されている。電気炉酸化スラグは、一般の普通骨材に比べて密度が大きいという特徴を活かし、港湾用のコンクリートブロックや砂防ダム、放射線遮蔽用コンクリートへ適用されてきた。しかし、電気炉酸化スラグをコンクリート用骨材として多量に使用した場合、プラスチックの低下、骨材の沈降、ブリーディング量の増加など材料分離の発生が指摘されている。上述した土木学会の設計・施工指針（案）では、フレッシュ時の性状および硬化コンクリートの品質を考慮し、粗骨材として砕石や砂利を単独で使用する場合は、電気炉酸化スラグ細骨材の容積混合率の上限を50%までとしている。また、2003年当初における細骨材は破砕スラグのみであったが、2011年頃から球形に近い風砕スラグの製造技術が確立された。この技術革新により、風砕スラグをコンクリート用細骨材として使用することで同一スランプを得るための単位水量や高性能AE減水剤の使用量を低減することが可能になった。

1.1.2 フライアッシュを取り巻く現状と課題

2011年の東日本大震災以降、我が国におけるエネルギー情勢が大きく変化する中、火力を中心としたエネルギー安定供給の要求があり、全国的に石炭火力発電所の稼働率は高まりつつある。石炭火力発電所稼働に伴い排出される石炭灰の発生量は、電力需要の拡大とともに年々増加し、定常的に年間1,000万トンを超える量が副産され、石炭灰の約90%はフライアッシュ、約10%はクリンカーアッシュとして排出される。従来、フライアッシュの大部分はセメント原料として利用されてきたが、近年の建設需要の低迷からセメント製造量は年々減少しており、セメント製造分野へのフライアッシュの供給は飽和状態になりつつある。また、埋め立て処分場の確保が困難になりつつあることや、環境負荷低減の観点から、より一層のフライアッシュの有効活用が望まれる。フライアッシュをコンクリート用混和材として有効利用する研究は以前から進められており、コンクリートの流動性改善、単位水量の低減、長期強度の増進、水和熱の低減、アルカリシリカ反応抑制等、優れた品質改善効果があることは実証されているが、フライアッシュを混和したコンクリートは広く普及しておらず、コンクリート用混和材としての利用量は全体排出量の1%

にも満たない。その理由として、フライアッシュ中に含まれる未燃炭素が AE 剤を吸着し、スランプや空気量の変動が大きくなることから、コンクリートのフレッシュ性状や耐凍害性が低下する危険性のあることが指摘されている。プレキャストコンクリート製品に着目すると、品質の安定しないフライアッシュを用いることでコンクリートの粘度が変動し、コンクリート打込み時に巻き込んだ空気が脱泡できず型枠面に気泡として現れるため、脱型後の製品肌面に多大な悪影響を及ぼす。また、粉体増量を目的とした高流動コンクリートにフライアッシュを多量に使用した場合、フライアッシュ中に含まれる未燃炭素が型枠充填時の振動によりコンクリート表面へ凝集され、黒ずみとして発生することがある。この黒ずみも表面気泡と同じく問題になることがあるが、本研究では表面気泡に着目するため研究対象の範囲外とした。問題提起としてここに記す。

1.1.3 高流動コンクリートを取り巻く現状と課題

コンクリート施工の省力化やコンクリートの高品質化を目指して、フライアッシュや石灰石微粉末等の混和材を多量に使用した自己充填性を有する粉体系高流動コンクリートの開発が行われてきた。粉体系高流動コンクリートは、フレッシュ時の材料分離抵抗性を損なうことなく流動性を高めたコンクリートであり、高い耐久性を有する。これまで、土木学会から「高流動コンクリート施工指針」と「高流動コンクリートの配合設計・施工指針 2012 年版」²⁾が、日本建築学会からは「高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説」が発刊され、高流動コンクリートの普及が図られてきた。また、2019 年には、生産性向上の一環として、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」における普通コンクリートの区分にスランプフローが追加された。プレキャストコンクリート製品工場では、従来のスランプコンクリートを高流動コンクリートに変更することで、振動締固め工程の省略や簡略化が可能となり、工場内の作業環境改善ならびに周辺への騒音対策を図ることが可能となった。さらに、製品の寸法精度の向上、型枠の維持管理費の削減、工場機械のシステム化と省人化に伴う製造コスト低減なども可能となった。一方で、高流動コンクリートは高い粘性を有することから、振動締固め作業をしない場合にはコンクリート表面に大きな気泡が多数発生することがある。この表面気泡がコンクリートの硬化性状や耐久性に与える影響は小さいが、製品的美観上から商品価値の低下を招くことがある。表面気泡を少なくする方法として、コンクリートのスランプフローが大きく流動性の高い配合を選定することや型枠表面へのコンクリートの付着の程度を良くする、コンクリート打込み時に微振動を与えて表面気泡の移動を促進する方法などがある。微振動を与える方法は、振動の効果がコンクリートの使用材料や配合条件毎に異なり、最適な振動条件を見出すためには膨大な実験を繰り返す必要がある。また、コンクリートの配合や加振条件、振動機の実験特性によっては低減効果が得られず、逆に表面気泡が増加することもあり、定量的な評価は困難である。製造効率や労働環境の改善を重視した場合、微振動を与えない、つまり自己充填性を有する流動性の高い高流動コンクリート配合を選定し、コンクリート内部に巻き込んだ空気を自然脱泡する適正粘度の把握を行うことが表面気泡の低減に有効であると思われる。コンクリートを粗骨材とモルタルからなる二相材料と

考え、モルタルをビンガム流体と仮定すると、モルタル相の流動性はレオロジー一定数（降伏値、塑性粘度）で表すことができる。表面気泡の発生量は、フレッシュコンクリートにおけるモルタル相の流動性の影響を受けると考えられるが、レオロジー一定数との関係について理論的な考察はほとんど行われていないのが現状である。また、国土交通省が推進している i-Construction の取り組みの一環として、コンクリート工全体の生産性向上を図るため、現場打ちコンクリートをプレキャストコンクリート製品にシフトする動きも積極的に進められており、高流動コンクリートを使用したコンクリート製品の美観向上に向けた取り組みは重要である。また、全国の生コンクリート工場では、通常のスランプコンクリートの延長上としての高流動コンクリートの出荷が一般的になっていない。その障害の一つに、粉体増量を目的とした混和材の種類によってコンクリートのフレッシュ性状が大きく異なり、多くの試し練りを必要とする点がある。振動締め不要な高流動コンクリートのフレッシュ性状は、スランプフロー、漏斗流下時間および自己充填性で評価される。スランプフローは降伏値に依存し、高性能 AE 減水剤の使用量によって目標スランプフローの範囲内に入るように制御することは難しくない。一方で、漏斗流下時間は塑性粘度と降伏値に依存するため、定量的評価が難しい。通常のコングリートでは降伏値と塑性粘度には相関性があるとされているが、高流動コンクリートではその関係性を明らかにされていないのが現状である。また、一般的なスランプ配合のコンクリートと比較して、所要のフレッシュ性状を満足するための単位水量や高性能 AE 減水剤の使用量が増加する傾向にある。

1.2 本研究の目的

本研究では、電気炉酸化スラグと粉体系高流動コンクリートそれぞれの特徴に着目した。粉体系高流動コンクリートの短所である単位水量および高性能 AE 減水剤の増加に対して電気炉酸化スラグの長所である単位水量低減効果、電気炉酸化スラグの短所であるブリーディング量の増大に対して高流動コンクリートの長所である高い材料分離抵抗性、互いの短所を長所で補うことで電気炉酸化スラグの新たな用途拡大に繋がると考えた。また、今後需要の増加が予想されるプレキャストコンクリート製品に着目し、工場製品の品質および美観向上を図るため、高流動コンクリートにおけるモルタル相の適正粘度および適切な材料選定の指標を示すことが可能となれば、実際の工場で行う配合決定までにかかる労力軽減や材料選定が容易となる。脱泡性、材料分離抵抗性、流動性の高い高流動コンクリートを確立することは、製造現場における生産性向上にも繋がると考えた。

以上のことを踏まえ、高い粘性により材料分離抵抗性に優れる粉体系高流動コンクリートについて、フライアッシュ混入量、水セメント比、単位水量等の違いが、電気炉酸化スラグ細骨材（風砕スラグ）を多量に使用した高流動コンクリートのフレッシュ性状、硬化性状および耐久性に及ぼす影響について評価を行い、電気炉酸化スラグ細骨材の適用の可能性について検討した。また、粉体系高流動コンクリートの降伏値と塑性粘度が表面気泡性状および脱泡性に及ぼす影響を明らかにすることを最終目的として、その基礎的研究として粉体系高流動モルタルを対象とし、混和

材の種類や単位量，細骨材容積比等が粉体系高流動モルタルの塑性粘度に与える影響について，B 型粘度計を用いて実験的に検討した。混和材としては，フライアッシュⅡ種，フライアッシュⅣ種，強熱減量を 1%以下に抑えたカーボンフリーフライアッシュおよび石灰石微粉末の 4 種類である。

第2章 既往の研究

2.1 調査結果

公益社団法人日本コンクリート工学会のホームページから、コンクリート工学年次論文集検索システムを使用し、関連する項目でキーワード検索を行った結果を表 2.1 に示す。キーワードを高流動コンクリート、フライアッシュ、塑性粘度で絞った場合、比較的多くの論文・報告が抽出されるが、電気炉酸化スラグについて着目し研究した事例は少ない。また、表面気泡や色むらについて着目した論文は少ないものの、コンクリート肌面に対する美観要求の高まりから、2010年以降も比較的多くの研究がされている。一方で、表面気泡に関する論文の多くは、製造設備や打込み方法、剥離剤（離型剤）による影響に絞った内容が多く、フレッシュコンクリートの性状が及ぼす影響について検討した論文は極めて少ないのが現状である。また、高流動コンクリートに対しそれぞれのキーワードで絞った場合、双方について着目し研究した論文は極めて少ない結果となった。本調査結果を踏まえ、電気炉酸化スラグ、フライアッシュ、高流動コンクリート、表面気泡性状に関する既往の研究について報告する。

表 2.1 検索結果

キーワード	全件数	2010～2018 年件数
高流動コンクリート/高流動モルタル	257	17
電気炉酸化スラグ	20	11
フライアッシュ/石炭灰	597	311
塑性粘度/降伏値/レオロジー	129	35
製品	58	26
表面気泡	20	8
色むら	7	4
高流動コンクリート×電気炉酸化スラグ	0	0
高流動コンクリート×フライアッシュ	21	4
高流動コンクリート×塑性粘度	10	0
高流動コンクリート×降伏値	12	0
高流動コンクリート×レオロジー	19	0
高流動コンクリート×表面気泡	5	1

2.2 研究事例報告

2.2.1 電気炉酸化スラグ

電気炉スラグは、電気炉で鉄スクラップ等を溶融して粗鋼を生産する際に副産され、酸化精錬で発生する酸化スラグと還元精錬で発生する還元スラグをあわせて、1年間に合計350万トン程度が生産されている。1980年代までは、電気炉内で両工程が行われていたので、酸化スラグと還元スラグの分離が困難で、還元スラグに含まれる遊離石灰 (f-CaO) と炉材からもたらされる遊離マグネシア (f-Mgo) がコンクリートを膨張破壊させるため、電気炉スラグをコンクリート用骨材として使用することはできなかった。その後、生産性と溶鋼の品質を向上させるために、酸化工程と還元工程が明確に区分され、電気炉酸化スラグを分離することができるようになり、コンクリート用骨材としての有効利用が可能となった。

電気炉酸化スラグのコンクリート用骨材としての利用に関しては、密度が大きいという特徴を活かし、水中で浮力の受けるコンクリートや放射線遮蔽コンクリート、砂防ダム等への用途が期待されてきた。環境負荷低減と高密度化対策の実用的な見地からは、骨材への混合率が100%であることが望ましいが、ブリーディングを始めとする特異な現象があり、一般的には混合率50%程度までが現状である。五味ら³⁾⁴⁾は、電気炉酸化スラグ粗骨材置換率100%の条件において、耐久性やワーカビリティ、圧縮強度などの観点から、施工可能な性能を持つ高密度コンクリートの標準的な調合について検討している。その結果、ブリーディング量を $0.6\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下に調整した場合、空気量の変化および気泡間隔係数に耐久性指数は影響を受けない傾向があり、普通コンクリートと同様に4%以上の空気量と $250\sim 300\mu\text{m}$ 以下の気泡間隔係数を確保すれば、所要の凍結融解抵抗性を得ることができるとしている(図2.1, 図2.2)。また、単位水量とW/Cが小さくなるほどブリーディングは抑制され、W/Cが大きい場合はブリーディングが短時間で終了し、W/Cが小さい場合は長時間かかる結果となった。これは、電気炉酸化スラグ粗骨材の表面がガラス質であるために保水能力が小さく、コンクリートの保水能力自体も低下するが、W/Cが小さくなるとコンクリート中の粉体量が増加し、自由水の移動制限や緻密性が向上したためにブリーディングが抑制されるものとしている(図2.3)。乾燥収縮に及ぼす電気炉酸化スラグ粗骨材混合率の影響として、混合率増加に伴い乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向があり、これは天然骨材より電気炉酸

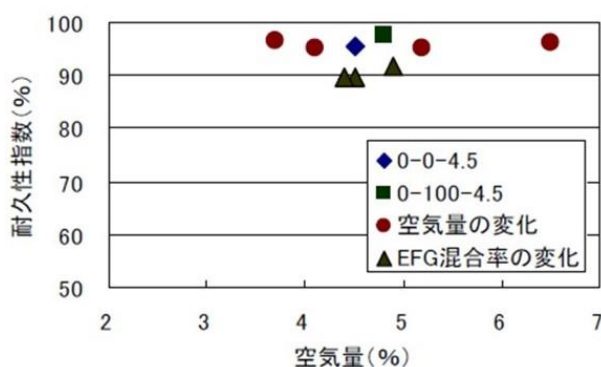


図 2.1 空気量と耐久性指数

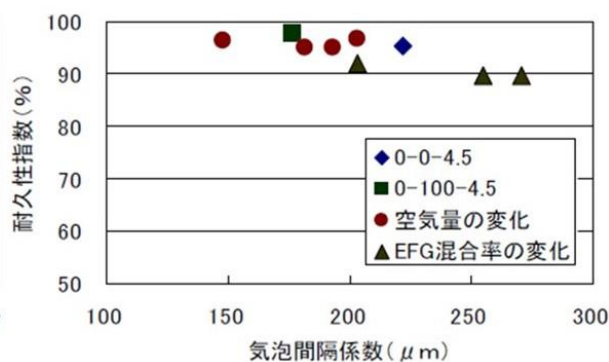
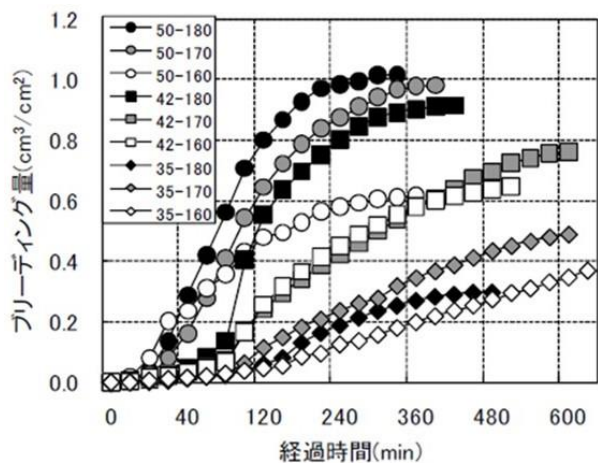


図 2.2 気泡間隔係数と耐久性指数

化スラグ粗骨材の弾性係数が大きく、収縮に抵抗すること等が考えられると報告している(図2.4)。以上のことより、W/C55%以下、単位水量 180kg/m³以下、単位セメント量 320kg/m³以上など、ブリーディングを抑制するためには条件付きで配合設計する必要があるとしている。



注) 判例の 50-180 は W/C と単位水量を示している。

図 2.3 ブリーディング量と経時時間

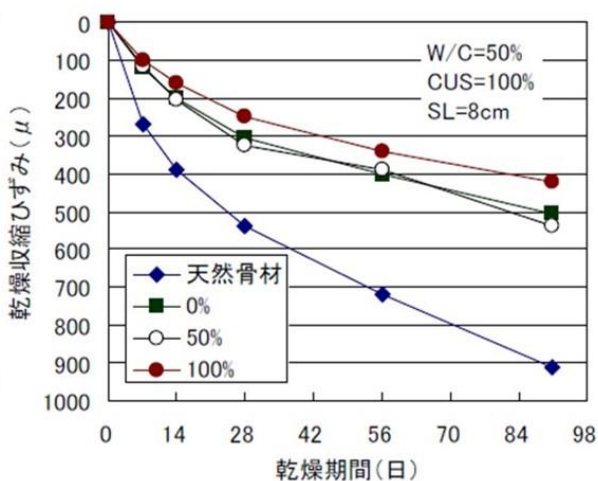


図 2.4 乾燥収縮と EFG 混合率

一方、小野ら⁵⁾は、密度の異なる電気炉酸化スラグ細骨材 2 種類について天然砂との混合率を変化させ、水セメント比や空気量、気泡間隔係数、ブリーディング量がコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響について報告している。その結果、既往の知見と同様に、空気量を 4%以上確保することにより耐久性指数 60 以上を満足し、電気炉酸化スラグ混合率の影響は小さいとしている(図 2.5)。また、ブリーディング量が多くなると耐久性指数は低下する傾向が観察されており(図 2.6)、ブリーディング量の増加に伴うコンクリート表層部の水密性の低下によるものと推察している。以上のことから、凍害環境下のコンクリートに電気炉酸化スラグ細骨材を使用する場合、従来の水セメント比や空気量の制限に加え、ブリーディングの影響も考慮する必要があると報告している。

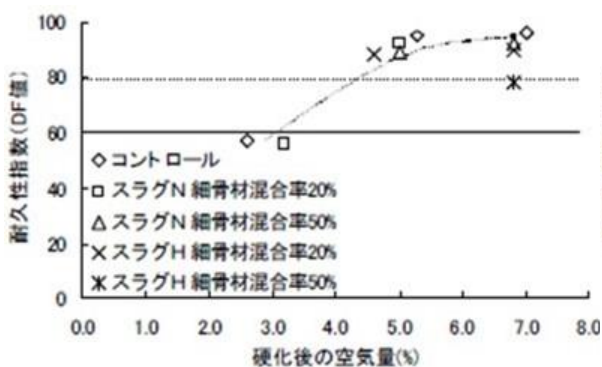


図 2.5 耐久性指数と空気量の関係

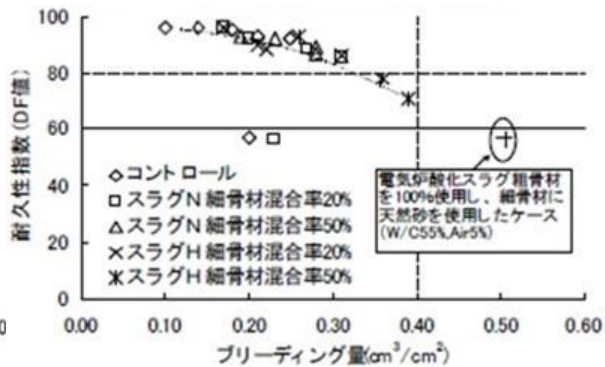


図 2.6 耐久性指数とブリーディング量の関係

電気炉酸化スラグ骨材コンクリートの特徴の一つとして、スラグ骨材の種類（銘柄）と使用量によっても異なるが、標準的な配合のコンクリートにおいてその凝結が普通骨材コンクリートの場合に比べ、1~3時間程度遅延することが報告されている。佐久間ら⁶⁾は、この凝結遅延に関しセメントの初期水和速度とブリーディングの影響に着目し、その原因について報告している。その結果、電気炉酸化スラグ細骨材（SS）の混合比が多くなるほど始発および終結ともに凝結時間が長くなっており（図 2.7）、S/C が大きいほど水和度の比は小さくなっている（図 2.8）。このことは、SS が初期水和を遅延することを示すものであり、SS を用いたモルタルの凝結遅延の原因の一つであるとしている。一方で、ブリーディング終了後のモルタル部分を除去した凝結時間とブリーディング量に明確な相関はみられず（図 2.9, 図 2.10）、ブリーディングの増加が凝結遅延に及ぼす影響は小さいと報告している。

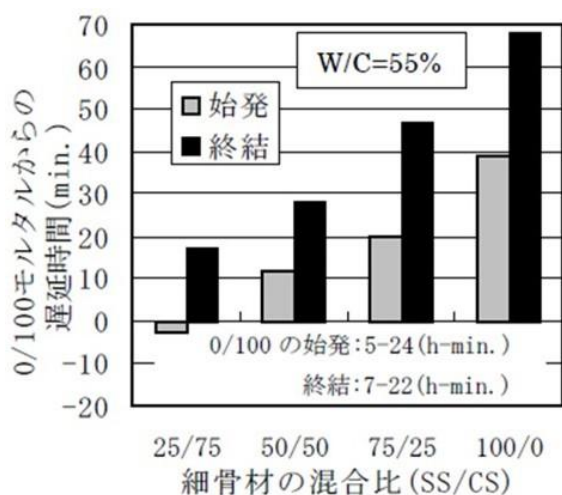


図 2.7 モルタルの凝結の遅延時間

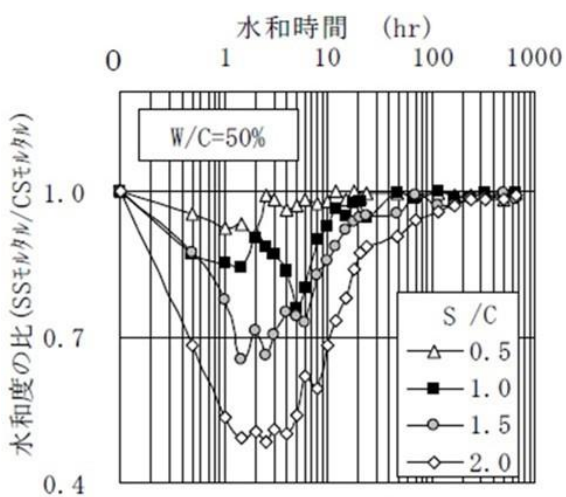


図 2.8 水和度の比の経時変化

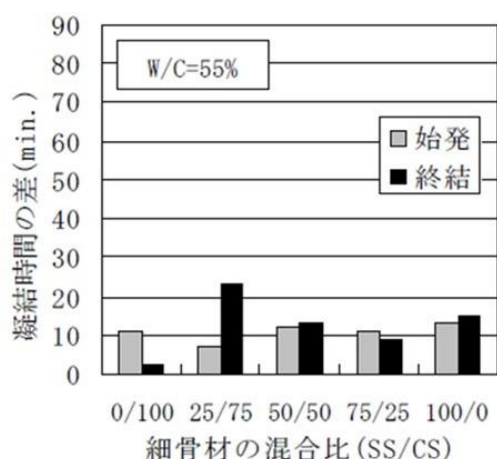


図 2.9 モルタル上層部の除去の影響

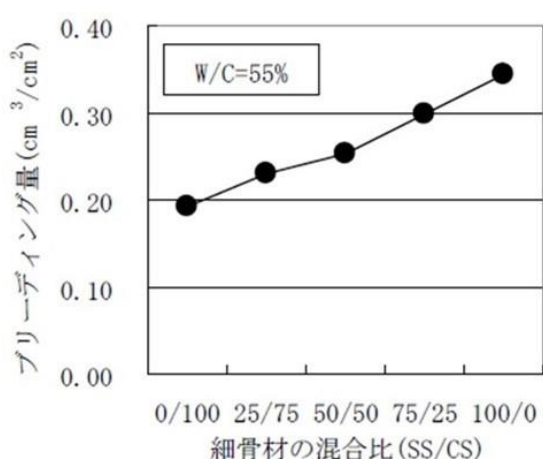


図 2.10 ブリーディング試験結果

最近では、電気炉酸化スラグが磁性損失によって電波を吸収し発熱する性質に着目し、電波を照射することで融雪する融雪用発熱モルタルブロックシステムについても研究報告されている⁷⁾。

以上のことより、電気炉酸化スラグを使用した研究のほとんどが高密度という特徴を活かした重量コンクリートへの適用に関するものであり、流動性や粘性の改善に着目した研究は極めて少ない。また、研究対象としたコンクリートの配合は一般的なスランプ配合（スランプ 8~18cm）が多く、電気炉酸化スラグを使用した高流動コンクリートのフレッシュおよび硬化性状について報告した事例は極めて少ないのが現状である。

2.2.2 フライアッシュ

コンクリート中の空気量は、ワーカビリティのみならず強度および耐凍害性に影響を及ぼす。フレッシュコンクリートの空気量は、コンクリート中に連行された微細な独立気泡のボールベアリング作用により、スランプ一定の場合、空気量1%で単位水量が2~4%減少される。硬化コンクリートでは、微細な独立気泡によって耐凍害性の向上に寄与する一方で、圧縮強度は空気量以外の条件が一定の場合、空気量が1%増加すると5~7%小さくなるため、空気量が所定の範囲にあるかどうか評価することは重要である。

フライアッシュ（以下、FA）を用いたコンクリートは、普通コンクリートに比べて耐凍害性が劣ることが報告されている⁸⁾。これは、FAに含まれる未燃炭素がAE剤を吸着することで空気連行性が低下し、さらに、連行した空気が経時に伴って減少しやすいこと⁹⁾や、凝結が遅れるためにブリーディングが増加し¹⁰⁾、ブリーディング中を移動する気泡に圧力が加わって消失することによるものと考えられる。小川ら¹¹⁾は、FAコンクリートの耐凍害性に関する検討の一環として、モルタル凝結過程における空気量の変化に関する実験的検討について報告している。その結果、

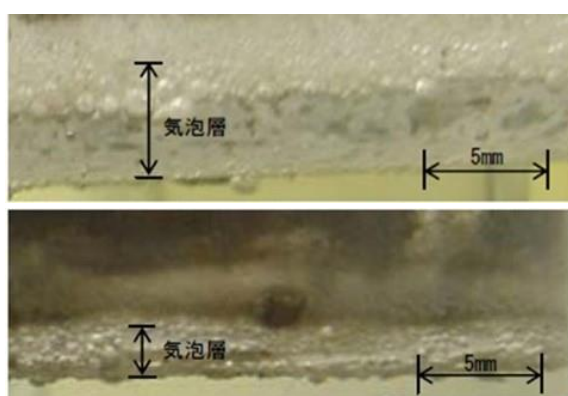


写真 2.1 モルタル上面の状況
(上: MF30, 下: OPC)

表 2.2 フレッシュ時および硬化後の比較

セメント種類	フレッシュ時空気量 (%)	硬化後空気量 (%)	空気減少量 (%)	気泡間隔係数 (中央部) (mm)
MF30	7.2	5.0	2.2	0.277
OPC	7.0	6.8	0.2	0.212

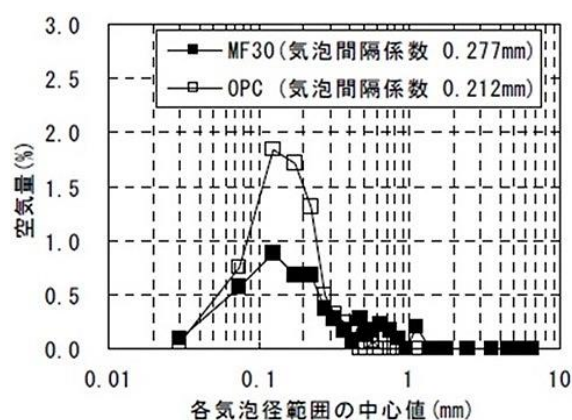


図 2.11 気泡分布 (供試体中央部)

写真 2.1 に示すように、普通ポルトランドセメント（OPC）ではブリーディング水上面の空気泡がわずかに確認される程度であったが、FA30%混入中庸熱ポルトランドセメント（MF30）では数多く確認されており、硬化後の空気減少量も大きくなった（表 2.2）。また、MF30では気泡径0.25mm未満の範囲が少ない結果となった（図 2.11）。FA を用いると未燃炭素が AE 剤を吸着するために気泡の分散性が低下して気泡が凝集しやすくなり、浮力が大きくなってブリーディング水とともに上面に移動しやすくなると述べている。以上のことより、FA コンクリートの場合、凝結過程において微細な気泡が消失するために、普通コンクリートよりも耐凍害性が低い傾向となることを示唆した。

北辻ら¹²⁾は、未燃炭素の影響を受けにくいムース状のプレフォーム型 AE 剤（PAE、写真 2.2）を用いて、微細な空気泡を混入することにより、耐凍害性を高めることを試みた。その結果、PAE は FA に含まれる未燃炭素の影響を受けにくく、空気量の制御が容易であり、気泡間隔係数もアフターフォーム型 AE 剤（AAE）に比べ小さくなったことから、耐凍害性においては有効に機能すると推察している（図 2.12）。

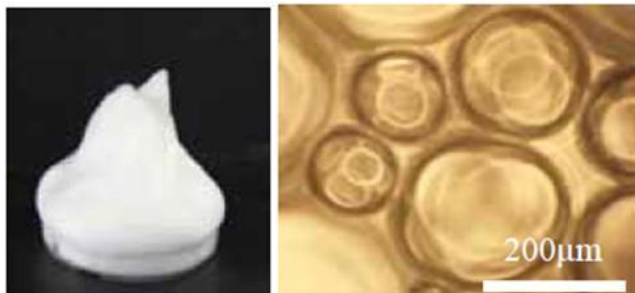


写真 2.2 PAE の泡

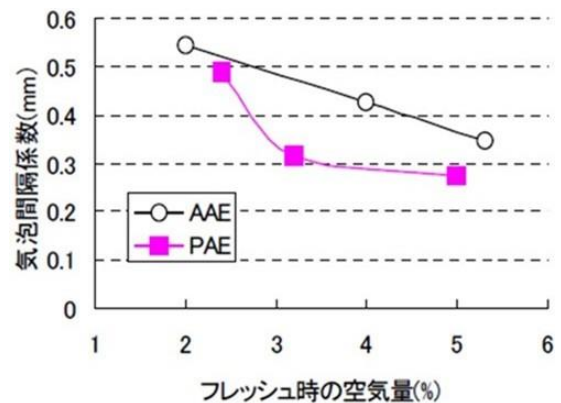


図 2.12 空気量と気泡間隔係数

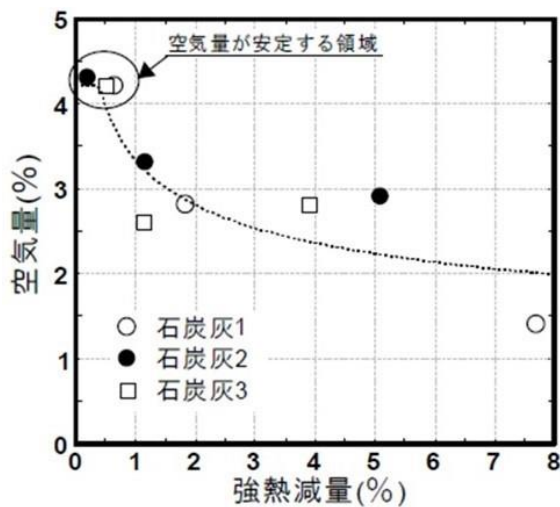


図 2.13 強熱減量と空気量

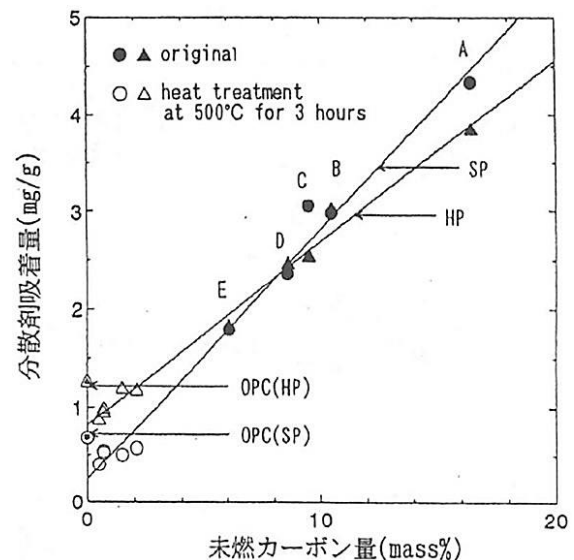


図 2.14 FA 中の未燃カーボン量と分散剤吸着量

最近では、FA の強熱減量を 1.0%以下に低減し、コンクリートの品質管理に悪影響を及ぼす未燃炭素量を低減した加熱改質 FA も開発されている。図 2.13 は、基準コンクリートの目標空気量を 4.0%とし、AE 減水剤および AE 剤量を同一にして、強熱減量を調整した FA をセメント質量の 10%混入した場合の空気量の測定結果である。強熱減量が大きくなるにつれて空気量が小さくなっているが、1.0%を下回るようになれば空気量の変動も小さくなっていることがわかる¹³⁾。

高性能 AE 減水剤の使用量に着目すると、FA の強熱減量が大きく、単位 FA 量が多くなるほど使用量は増加する傾向にあると報告されており¹⁴⁾¹⁵⁾、FA 中に含まれる未燃炭素は高性能 AE 減水剤等を含む分散剤も吸着し、流動性に悪影響を及ぼすとしている(図 2.14)。

以上のことより、FA をコンクリート用材料として多量に使用する場合、所要のフレッシュ性状や耐凍害性を満足するための高性能 AE 減水剤や AE 剤の使用量が増加すると考えられる。

2.2.3 高流動コンクリート

高流動コンクリートとは、フレッシュコンクリートにおいて材料分離抵抗性を損なうことなく流動性を高めた、スランプフローによる管理が必要なコンクリートのことである。このうち、土木学会の設計・施工指針²⁾では、締固め作業を行うことなく、型枠等の隅々まで材料分離を生じることなく充填できる自己充填性を有する高流動コンクリートを対象としている(図 2.15)。

高流動コンクリートの自己充填性能は、充填試験装置を用いた間隙通過試験方法によって評価することができるが、充填試験装置の形状には U 形とボックス形の 2 種類が併記されており、形状の違いが自己充填性能に与える影響については明記されていない。西川ら¹⁶⁾は、2 種類の形状の違いが装置内の流動性状に与える影響について、粘性が異なる配合の高流動コンクリートを用いて実験的検討を行っている。その結果、全ての配合において U 形の方がボックス形より充填高さは大きくなり(図 2.16)、可視化実験においてもボックス形にせん断面の発生が確認できる(図 2.17)ことから、ボックス形装置による充填性評価の方が、U 形よりも厳しい充填性試験となると報告している。また、図 2.18 に示すように、ボックス形の場合、300mm 以上の充填高さを確保するためには、U 形の場合と比較して、単位粗骨材絶対容積の上限値をさらに小さく設定するとともに、スランプフローの許容範囲も限定する必要がある結果が得られている¹⁷⁾。

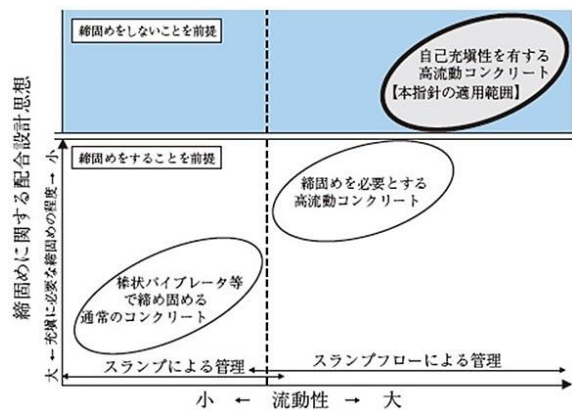


図 2.15 概念図

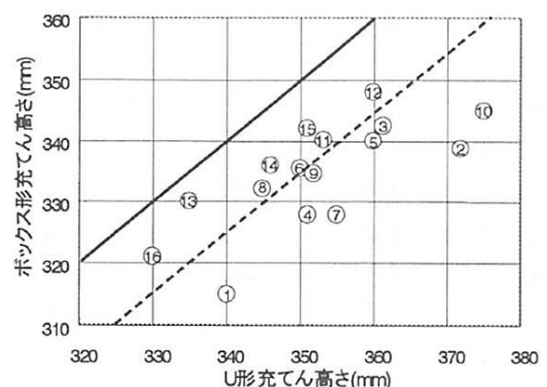


図 2.16 ボックス形と U 形の関係

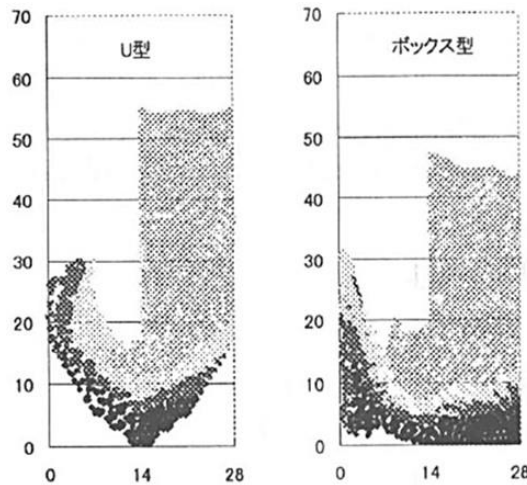


図 2.17 流動状況解析結果

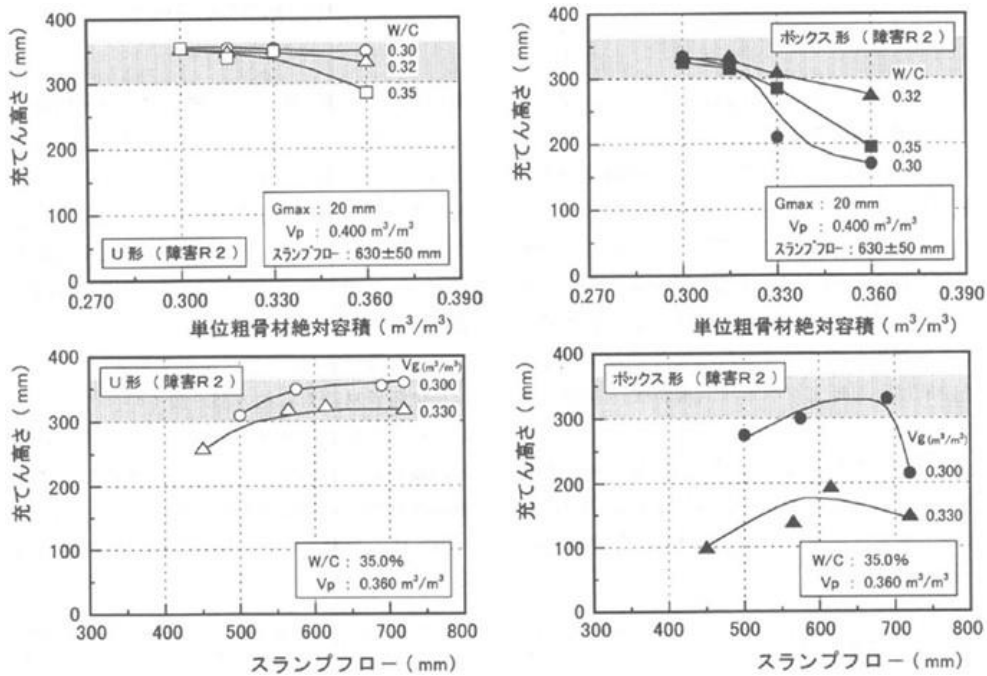


図 2.18 単位粗骨材絶対容積，スランプフローと充填高さ
(左：U形 右：ボックス形)

高流動コンクリートのフレッシュ時における流動性は、スランプフローとスランプフロー速度で評価することができ、これらの指標はフレッシュコンクリートをビンガム流体と仮定したときのレオロジー定数（降伏値，塑性粘度）に大きく関連している。コンクリートをモルタルと粗骨材で構成される二相系材料と考えた場合、高流動コンクリートの流動性を評価するためには、モルタルの流動特性を把握することが重要である。一般に、高流動コンクリートの配合設計には所要の性能を満足するための配合決定までに試し練りを多く必要とするため、現場への負担が大きい。高流動モルタルのレオロジー定数から高流動コンクリートの流動性を判断するレオロジー定数を推定できれば、少ない労力で配合設計が可能になる。その点に着目した研究¹⁸⁾¹⁹⁾は以前から行われているが、実用化にまでは至っていないのが現状である。

2.2.4 表面気泡

高流動コンクリートをプレキャストコンクリート製品に使用した場合、コンクリートの型枠面に生じる気泡が問題となる。同一規格で大量に生産されるコンクリート製品では、コンクリート表面の仕上がりが重要視され、強度上問題がない場合でも表面気泡を施主や施工管理者が嫌う傾向にあり、多くの工場に対応に苦慮している。表面気泡の発生要因を大別すると、①コンクリート、②混和剤、③剥離剤、④製造などがあり、それぞれ①にはコンクリートの材料、配合、スランプフローや空気量、②には混和剤の表面張力、剥離剤との界面張力、消泡剤の使用量、③には剥離剤ならびに界面活性剤の種類、④には型枠の形状や材質、打込み高さや速度、微振動による締固めなどがある。また、表面気泡を少なくする方法としては、コンクリートのスランプフローが大きく流動性の高い配合を選定することや型枠表面へのコンクリートの付着の程度を良くする、コンクリート打込み時に微振動を与えて表面気泡の移動を促進する方法などがある。

三田ら²⁰⁾は、コンクリート表面に発生する気泡に着目し、表面気泡の発生メカニズムについて検討した結果について報告している。まず、配合による影響を調べるために、細骨材率を一定とし、水セメント比を 33, 40, 50%の 3 段階に変化させ、また比較のために、水セメント比 50%の配合において単位水量を増加させて実験を行っている。混和剤は、天然樹脂酸塩系 AE 剤 (A)、セルロース系高流動コンクリート用増粘剤 (V)、オキシカルボン酸系超遅延剤 (R) の 3 種類を用いた。これによると、W/C が小さくなるに伴い、増粘剤 (R) を用いることによる粘性の増大に伴い表面気泡面積率は増加する傾向にあった (図 2.19)。また、スランプ 15cm 程度まではスランプの増大に伴い表面気泡は減少するものの、それよりスランプが大きくなると気泡は増加する傾向にあった。s/a 一定の条件で単位水量を増加しスランプを大きくすると、材料分離によってコンクリート中より型枠面に気泡が析出しやすくなったことによると推察している (図 2.20)。

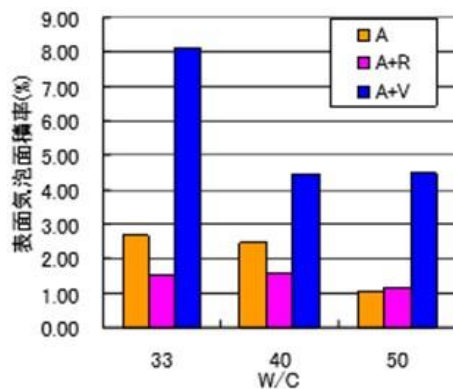


図 2.19 表面気泡面積率と W/C の関係

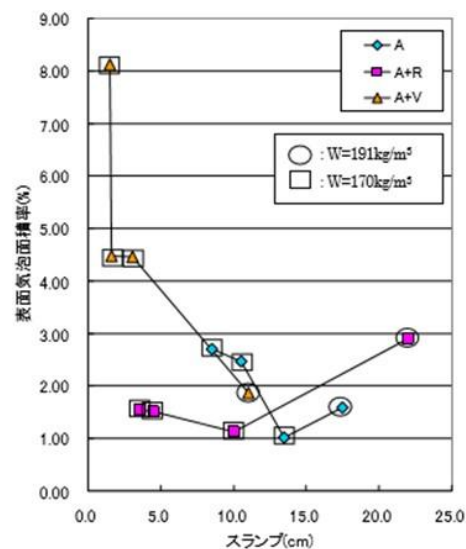


図 2.20 表面気泡面積率とスランプの関係

一宮ら²¹⁾は、表面気泡発生に関わる影響要因のうち、剥離剤の種類に着目し、表面気泡発生のメカニズムを検討している。鋼製型枠に油性タイプ2種（ベースオイルのみのものを油性タイプA、ベースオイルに界面活性剤を添加したものを油性タイプB）と、水性タイプの3種類の剥離剤を塗布して、高流動コンクリートを自己充填させた供試体により表面気泡への影響を調査している。一般に、油性と水性剥離剤のタイプで表面気泡の深さ方向の形状が異なり、油性タイプでは表面気泡が開口するのに対し（図2.21a）、水性タイプでは表面近傍にあるが脱型後表面に開口しない隠れ気泡となる（図2.21b）。この隠れ気泡は、コンクリート表面に触れるだけでペースト膜が破壊され開口するものが多い。コンクリート面積に対する表面気泡面積の比率を直径 d_{sv} 1.0mm毎に累計で表したものを図2.22に、隠れ気泡測定後に表面をグラインダーで研磨した表面を数値化したものを図2.23に示す。剥離剤の種類で表面気泡の発生状況は異なり、油性タイプでは界面活性剤を添加したものが表面気泡は少なく、水性タイプでは表面気泡はほとんど見受けられない結果となった。また、油性タイプと水性タイプの比較では、水性タイプの表面気泡は少ないが、表面気泡の開口部がセメントペーストで覆われた隠れ気泡が多く発生していることが確認されたと報告している。

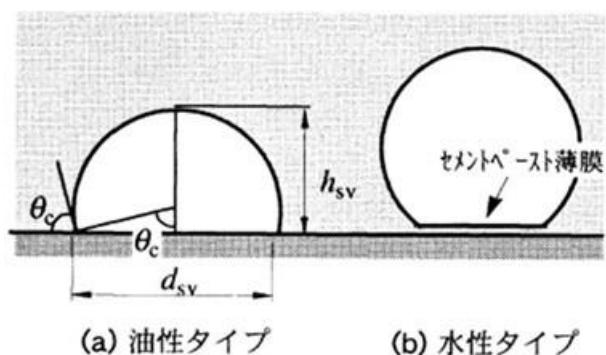


図 2.21 剥離剤のタイプと表面気泡の深さ方向の形状

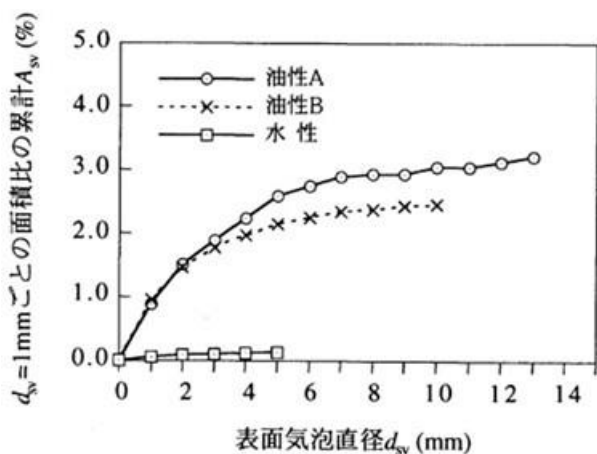


図 2.22 表面直径 1mm 毎の面積比の累計

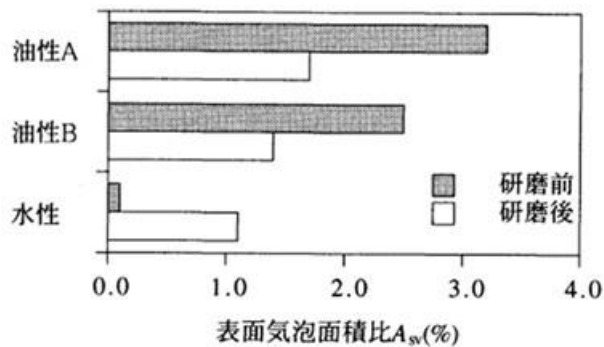


図 2.23 表面研磨前後の気泡面積比

建築分野だけでなく土木分野においても、打放しコンクリートの美観への関心が高まっている。黒田ら²²⁾は、異業種における生物模倣技術を応用した超撥水技術に着目し、コンクリート型枠への適用について検討している。写真 2.3 に撥水加工の有無による水の接触角の観察結果を示す。液滴の接触角は、撥水加工していない場合 79.7°であるのに対し、撥水加工した場合は 152.5°であり、超撥水性を有している。実験の結果、型枠の材質の違いによらず超撥水機構を有する型枠の使用によって、脱型後のコンクリートの表面気泡と色むらは抑制されている(写真 2.4)。また、表面気泡の抑制効果が認められるのは接触角が 140°以上の場合であり、150°を超えるとほとんど気泡も色むらもない仕上がりとなった(図 2.24, 写真 2.5)。一方で、接触角 90° ~ 130° では、接触角が大きくなるにつれ表面気泡率は増加しているが、これは接触角の増加に伴って形成される気泡の形状が浅く平坦なものに変化し、気泡面積が増加したためではないかと推測している。

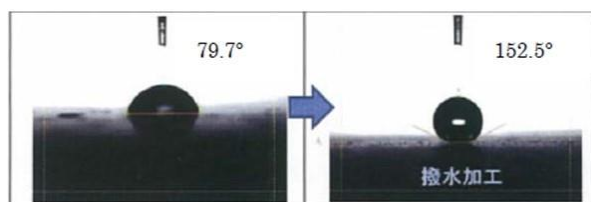


写真 2.3 撥水加工の有無による接触角の違い

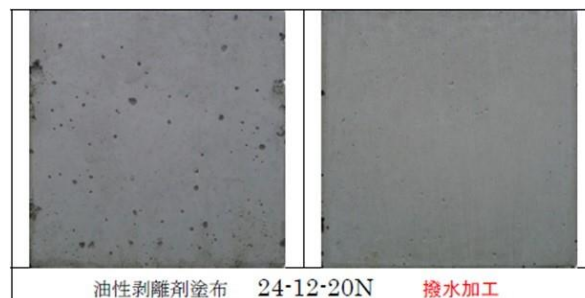


写真 2.4 撥水加工の有無によるコンクリート面の違い

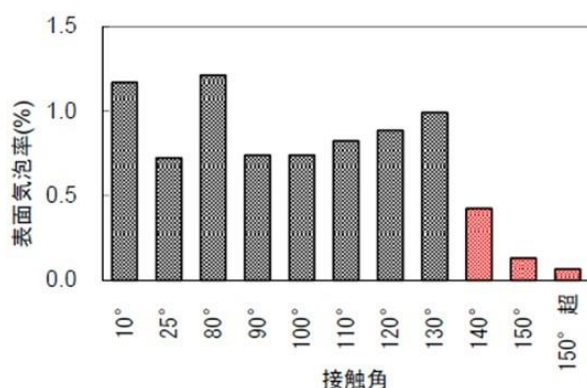


図 2.24 型枠の接触角と表面気泡率の関係

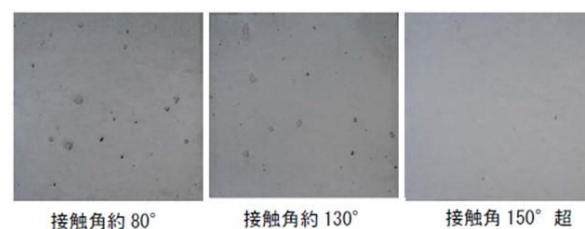


写真 2.5 表面気泡

勾配のあるコンクリート面には、表面気泡が生じやすいとされている。これは、勾配を有する型枠では、勾配が緩くなるほどコンクリートに蓋をするような形になり、気泡やブリーディング水が上面に抜けにくくなるためである。黒田ら²²⁾は、勾配を有する型枠について超撥水による気泡抑制効果の検討を行っている（写真 2.6）。その結果、勾配が小さいほど、超撥水機構を有する型枠による表面気泡の抑制効果は顕著になる傾向にあったと報告している（図 2.25、図 2.26）。



写真 2.6 撥水加工の有無による浮き型枠の勾配

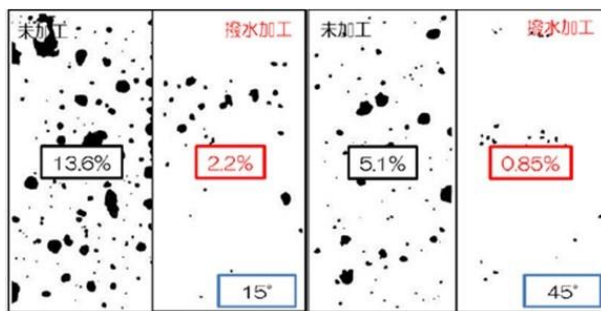


図 2.25 勾配の異なる型枠による表面気泡の違い

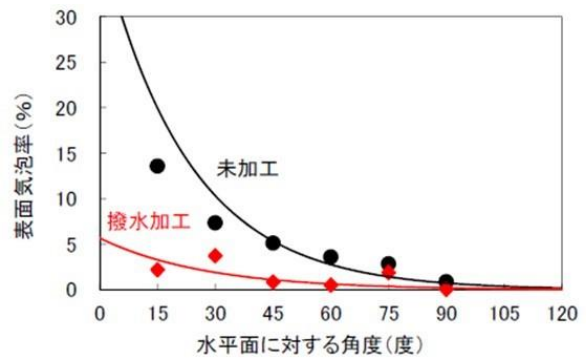


図 2.26 型枠の角度と表面気泡率の関係

山田ら²³⁾は、表面気泡抜き取り装置（写真 2.7）による表面気泡除去過程を可視化実験により明らかにすることを試みた。その結果、表面気泡抜き取り装置の挿入により気泡がピアノ線に集まり、引き抜く際に生じるピアノ線の通り道から気泡が上昇して消失することが分かった（写真 2.8）。一方で、引き抜きが早い場合、表面気泡として通り道が残存する可能性が示唆された（写真 2.9）。これは、コンクリート試験体で評価した場合でも同様の結果が確認されており、ワーカビリティが不十分な配合や締固められにくい箇所では、装置による表面の締固め効果が表れ易いと報告している。



写真 2.7 表面気泡抜き取り装置

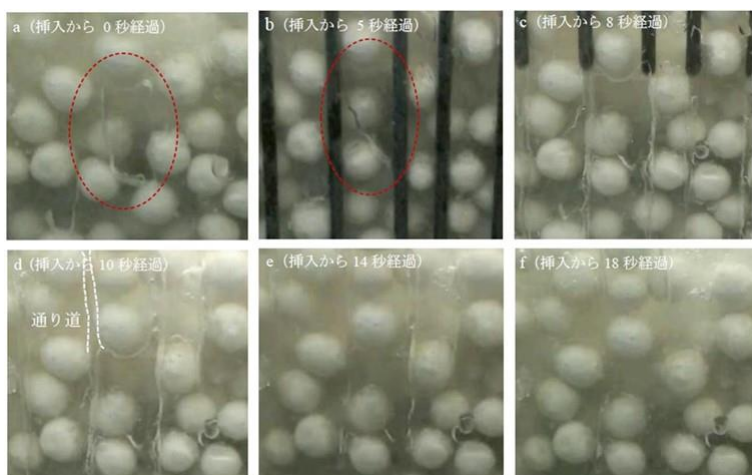


写真 2.8 表面気泡除去の様子

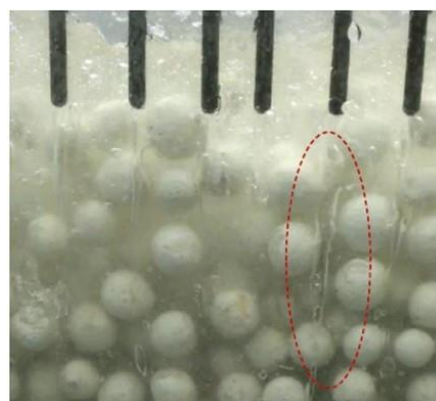


写真 2.9 装置通過後の様子

以上のことより，コンクリート表面に発生する気泡に着目した研究はあるものの，製造設備や打込み方法，剥離剤による影響について報告している内容が多く，フレッシュコンクリートのレオロジー一定数に着目し，気泡自体の脱泡性について評価した研究は極めて少ないのが現状である。

第3章 電気炉酸化スラグ細骨材とフライアッシュを用いた粉体系高流動コンクリートに関する基礎的性状評価

3.1 はじめに

電気炉酸化スラグ細骨材を用いたコンクリートは、ブリーディングの発生と骨材自体の密度が大きいため材料分離抵抗性は良好ではない。本章では、高い粘性により材料分離抵抗性に優れる粉体系高流動コンクリートに着目し、電気炉酸化スラグ細骨材を多量に使用した高流動コンクリートのフレッシュおよび硬化性状について検討を行った。

3.2 実験概要

3.2.1 使用材料および特性

(1) 電気炉酸化スラグ細骨材の製造状況および外観形状

電気炉酸化スラグ細骨材の製造状況および外観形状を**写真 3.1** に示す。まず、専用の釜で電気炉から副産された熔融スラグを専用車両で風砕建屋に運搬する (①)。その後、傾動式の釜に熔融スラグを移し替える (②)。移し替えられた熔融スラグの入った釜を徐々に傾け (③)、流れ落ちる熔融スラグに後方から風を送り空気中に飛ばす (④、⑤) ことで、球形に近いスラグ骨材 (⑥) ができる。なお、この電気炉酸化スラグ細骨材の真球度は 0.92 程度である²⁴⁾。



写真 3.1 電気炉酸化スラグの製造状況および外観形状

(2) 使用材料の物理的性質

本実験に使用した材料の物理的性質を表 3.1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は砂岩砕砂（以下、NS と略記）、石灰砕砂（以下、LS と略記）および電気炉酸化スラグ細骨材（以下、EFS と略記）の 3 種類とし、粗骨材は最大寸法 20mm の石灰砕石とした。粉体量の増加を目的とした混和材にはフライアッシュ（以下、FA と略記）、混和剤は増粘成分を含まないポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤（以下、SP 剤と略記）を使用した。なお、EFS は JIS A 5011-4 に規定される EFS5-0.3、FA は JIS A 6201 に規定される II 種に適合するものを用いた。EFS は NS、LS に比較して、密度が大きく吸水率が小さいことがわかる。3 種類の細骨材（NS、LS、EFS）の粒度曲線を図 3.1 に示す。

表 3.1 使用材料の物理的性質

材料名	記号	種類および物性値
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度：3.16 g/cm ³ ，比表面積：3470 cm ² /g
混和材	FA	フライアッシュ II 種 密度：2.30 g/cm ³ ，比表面積：3680 cm ² /g，強熱減量：2.6 %
水	W	上水道水
細骨材	NS	砂岩砕砂 表乾密度：2.58 g/cm ³ ，吸水率：1.96 %，粗粒率：2.67
	LS	石灰砕砂 表乾密度：2.66 g/cm ³ ，吸水率：0.88 %，粗粒率：2.85
	EFS	電気炉酸化スラグ 5-0.3 表乾密度：3.52 g/cm ³ ，吸水率：0.36 %，粗粒率：3.38
粗骨材	G	石灰砕石 2005 表乾密度：2.70 g/cm ³ ，吸水率：0.51 %，実績率：61.0 %
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤 ポリカルボン酸エーテル系
	AE	AE 助剤 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

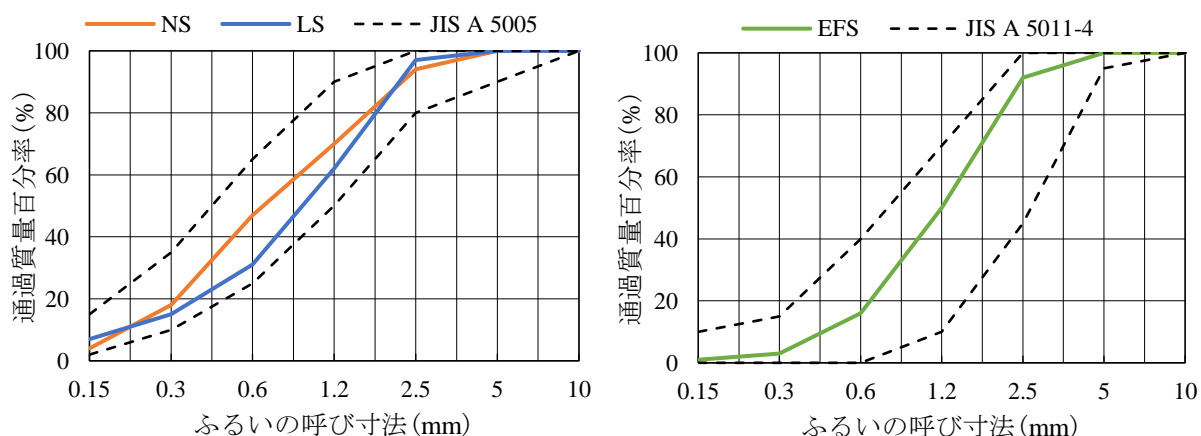


図 3.1 粒度曲線（左：NS, LS 右：EFS）

3.2.2 配合要因

本研究の配合要因を表 3.2 に、コンクリートの配合一覧を表 3.3(a)～(c)に実験シリーズ別に示す。実験シリーズ 1 では、水セメント比 50%，単位水量 175kg/m³ の一定とし、単位粉体量を 450, 500, 550kg/m³ の 3 水準、EFS を NS, LS に対しそれぞれ 0, 50, 75, 100%容積置換した。実験シリーズ 2 では、単位粉体量 500kg/m³，単位水量 175kg/m³ の一定とし、水セメント比 55, 50, 45%の 3 水準、EFS を NS, LS に対しそれぞれ 0, 50, 100%容積置換した。実験シリーズ 3 では、単位粉体量 500kg/m³，細骨材を EFS のみとし、単位水量 185, 175, 165kg/m³ の 3 水準、各水準に対し水セメント比 55, 50, 45%とした。各実験シリーズにおいて、粉体系高流動コンクリートの基礎的性状に及ぼす影響を、実験シリーズ 1 では EFS 置換率および単位粉体量(単位 FA 量)、実験シリーズ 2 では単位粉体量一定の条件で水セメント比を増減することによるセメントと FA の割合変化、実験シリーズ 3 では単位水量の違いについて評価することとした。コンクリートの目標スランプフローは 65cm，目標空気量は 4.5%とし、所要のフレッシュ性状を満足するように SP 剤と AE 剤の使用量を調整した。なお、本実験で使用した NS, LS, EFS の粗粒率は大きく異なるため、各配合におけるコンクリートのフレッシュ性状を一定とするために、単位粗骨材かさ容積を調整し配合修正を行った。その結果、EFS 置換率の増大に伴い単位粗骨材かさ容積は小さくなり、NS100%配合に比較して EFS100%配合の単位粗骨材かさ容積は 50L/m³ 程度、LS100%配合に比較して EFS100%配合の単位粗骨材かさ容積は 40L/m³ 程度小さくなった。

表 3.2 配合要因

要因	シリーズ 1	シリーズ 2	シリーズ 3
水セメント比	50	55, 50, 45	55, 50, 45
単位水量	175	175	185, 175, 165
単位粉体量	450, 500, 550	500	500
EFS 置換率	0, 50, 75, 100	0, 50, 100	100
試験水準	21 水準	15 水準	9 水準

3.2.3 コンクリートの練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜには、容量 100 リットルの強制二軸ミキサを用いた。最初にセメント、FA、細骨材を投入し 10 秒間空練りした後、混和剤を溶解した水を加えて 60 秒間、さらに粗骨材を加えて 60 秒間の練混ぜを行った。ミキサ停止後、5 分間の静置を行い、30 秒間練混ぜた後排出した。また、実験シリーズ 1 における単位粉体量 550kg/m³ とした配合 7 水準については、モルタルの練混ぜ時間を 60 秒から 120 秒に延長した。5 分間の静置時間を設けた理由は、高性能 AE 減水剤の十分なセメント分散効果を引き出すためである。なお、それぞれの段階での操作の開始時間誤差は、±1 秒以内とした。

表 3.3(a) コンクリートの配合一覧 (実験シリーズ 1)

配合記号*1	W/C (%)	W/P (%)	P*2 (kg/m ³)	Gm*3 (L/m ³)	単位量(kg/m ³)						SP (P×%)	AE*4 (C×%)					
					W	C	FA	NS	LS	EFS			G				
100-N100	50	38.9	450	535	175	350	100	774	-	-	880	1.400	12.0A				
100-N50E50				402				-	549	848	0.900	13.0A					
100-N25E75				205				-	840	832	0.675	9.0A					
100-L100				-				814	-	864	0.950	11.0A					
100-L50E50				-				423	560	832	0.700	9.5A					
100-L25E75				-				215	855	815	0.600	9.0A					
100-E100				-				-	1162	799	0.500	7.0A					
150-N100				35.0				500	540	175	350	150	710	-	-	888	1.425
150-N50E50		370	-				505		856				0.900	13.0A			
150-N25E75		178	-				774		840				0.700	11.0A			
150-L100		-	747				-		872				0.900	13.0A			
150-L50E50		-	390				516		840				0.750	13.0A			
150-L25E75		-	199				789		824				0.650	11.0A			
150-E100		-	-				1074		807				0.500	9.0A			
200-N100		31.8	550				550		175				350	200	635	-	-
200-N50E50				334			-	456				872			0.900	14.0A	
200-N25E75	171			-	700	856	0.675	11.0A									
200-L100	-			673	-	888	1.000	21.0A									
200-L50E50	-			352	466	856	0.825	21.0A									
200-L25E75	-			180	715	840	0.700	19.0A									
200-E100	-			-	975	824	0.600	17.0A									

*1 単位 FA 量—細骨材種別 (N : 砂岩砕砂, L : 石灰砕砂, E : 電気炉酸化スラグ) 置換率

*2 単位粉体量 P=C+FA *3 単位粗骨材かさ容積 *4 AE 剤は 1A=0.001%で計算する。

表 3.3(b) コンクリートの配合一覧 (実験シリーズ 2)

配合記号*1	W/C (%)	W/P (%)	P (kg/m ³)	Gm (L/m ³)	単位量(kg/m ³)						SP (P×%)	AE (C×%)					
					W	C	FA	NS	LS	EFS			G				
55-N100	55	35.0	500	550	175	350	181	681	-	-	907	1.300	15.0A				
55-N50E50				357				-	488	872	0.800	15.0A					
55-L100				-				721	-	888	0.825	18.0A					
55-L50E50				-				376	498	856	0.675	17.0A					
55-E100				-				-	1038	824	0.450	11.0A					
50-N100	50*2			35.0			500	540	175	350	150	710	-	-	888	1.425	14.0A
50-N50E50								370				-	505	856	0.900	13.0A	
50-L100								-				747	-	872	0.900	13.0A	
50-L50E50								-				390	516	840	0.750	13.0A	
50-E100								-				-	1074	807	0.500	9.0A	
45-N100	45	35.0	500		540	175		350			111	722	-	-	888	1.450	16.0A
45-N50E50					377							-	514	856	0.925	12.0A	
45-L100					-							761	-	872	0.900	12.0A	
45-L50E50					-							396	524	840	0.700	10.0A	
45-E100					-							-	1091	807	0.600	5.0A	

*1 水セメント比—細骨材種別 (N : 砂岩砕砂, L : 石灰砕砂, E : 電気炉酸化スラグ) 置換率

*2 実験シリーズ 1 の結果を用いる。

表 3.3(c) コンクリートの配合一覧（実験シリーズ 3）

配合記号*1	W/C (%)	W/P (%)	P (kg/m ³)	Gm (L/m ³)	単位量(kg/m ³)						SP (P×%)	AE (C×%)	
					W	C	FA	NS	LS	EFS			G
185-55	55	37.0	500	500	185	337	163	-	-	1014	824	0.350	8.0A
185-50	50			490		370	130	-	-	1045	807	0.375	6.0A
185-45	45			490		412	88	-	-	1063	807	0.400	3.0A
175-55	55	35.0*2		500	175	319	181	-	-	1038	824	0.450	11.0A
175-50	50			490		350	150	-	-	1074	807	0.500	9.0A
175-45	45			490		389	111	-	-	1091	807	0.600	5.0A
165-55	55	33.0		500	165	300	200	-	-	1067	824	0.525	11.0A
165-50	50			490		330	170	-	-	1102	807	0.550	8.0A
165-45	45			490		367	133	-	-	1116	807	0.600	5.0A

*1 単位水量－水セメント比 *2 実験シリーズ 1, 2 の結果を用いる。

3.2.4 試験項目および方法

試験項目および試験方法を表 3.4 に示す。フレッシュ性状の確認は、コンクリートの状態を目視で観察するとともに、スランプフロー、空気量、単位容積質量、ブリーディングおよび充填試験（U 形）、流下試験（V 漏斗）を実施した。硬化性状は、圧縮強度および静弾性係数、乾燥収縮、凍結融解試験を実施し、それぞれ関連する試験方法に準拠した。乾燥収縮試験は、JIS A 1129 に規定されている長さ変化試験方法（以下、JIS 法）と、井上ら²⁵⁾が提案しているコンクリートを低温炉乾燥することにより乾燥収縮を促進させる急速乾燥収縮試験（以下、迅速法）を実施した。また、凍結融解試験では、橋本ら²⁶⁾が提案している液体窒素ガスを用いた簡易的凍結融解試験を実施した。この試験方法の 10 サイクルが、JIS A 1148 に規定されている凍結融解試験の 300 サイクルに相当すると報告しており²⁷⁾、表層部の劣化を短いサイクル数で確認できる。

表 3.4 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	備考
スランプフロー	JIS A 1150	65±5cm
空気量	JIS A 1128	4.5±1.5%
単位容積質量	JIS A 1116	
ブリーディング	JIS A 1123	0.3cm ³ /cm ² 以下
充填試験	JSCE-F 511	充填高さ (R2) 300mm 以上
流下試験	JSCE-F 512	流下時間 13 秒以下
圧縮強度	JIS A 1108	標準養生 7, 28, 91 日
静弾性係数	JIS A 1149	標準養生 28, 91 日
乾燥収縮	JIS A 1129-2	JIS 法 材齢 182 日
	急速乾燥収縮試験 ²⁵⁾	迅速法 材齢 56 日
凍結融解	簡易凍結融解試験 ²⁶⁾	10 サイクル


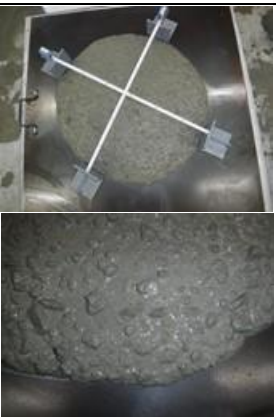


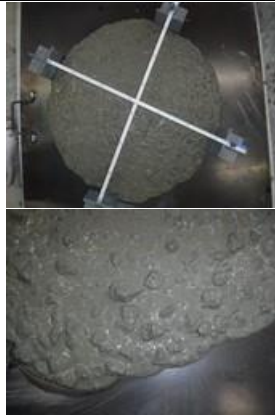




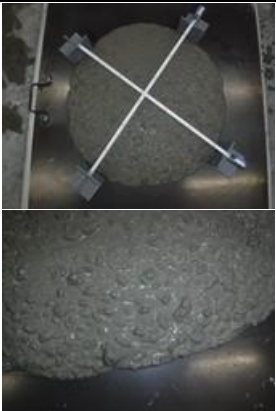

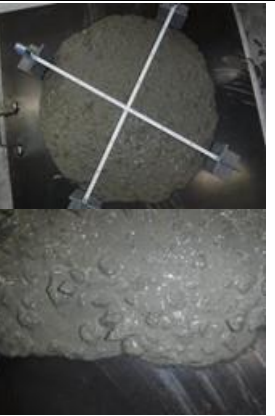
3.3 実験結果および考察


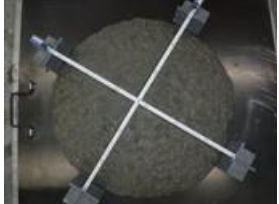















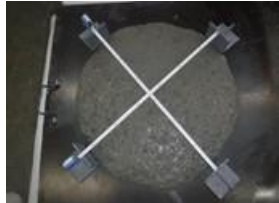
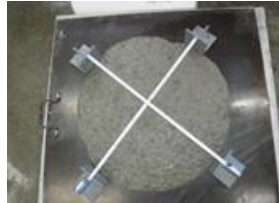











3.3.1 フレッシュコンクリートの性状


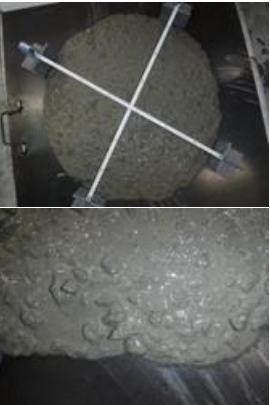






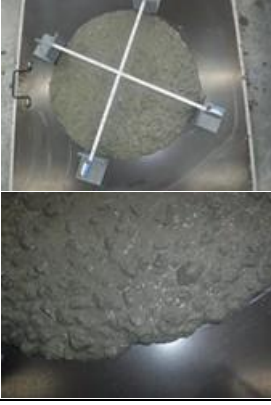





(1) 目視確認

各配合におけるスランプフローの状況を表 3.5 に示す。上側が全体写真、下側がフロー先端部写真である。目視確認の結果、全ての配合で材料分離は生じておらず、フロー先端までモルタルと粗骨材が一体となって流動していることが確認できた。また、タンピング試験についても実施したが、モルタルと粗骨材が分離するような異常は確認できなかった。

表 3.5 スランプフローの目視確認結果一覧

Series1/100-N100	Series1/100-N50E50	Series1/100-N25E75	Series1/100-L100
			
Series1/100-L50E50	Series1/100-L25E75	Series1/100-E100	Series1/150-N100
			
Series1/150-N50E50	Series1/150-N25E75	Series1/150-L100	Series1/150-L50E50
			

Series1/150-L25E75	Series1/150-E100	Series1/200-N100	Series1/200-N50E50
			
			
Series1/200-N25E75	Series1/200-L100	Series1/200-L50E50	Series1/200-L25E75
			
			
Series1/200-E100	Series2/55-N100	Series2/55-N50E50	Series2/55-L100
			
			
Series2/55-L50E50	Series2/55-E100	Series2/50-N100	Series2/50-N50E50
			
			

<p>Series2/50-L100</p> 	<p>Series2/50-L50E50</p> 	<p>Series2/50-E100</p> 	<p>Series2/45-N100</p> 
<p>Series2/45-N50E50</p> 	<p>Series2/45-L100</p> 	<p>Series2/45-L50E50</p> 	<p>Series2/45-E100</p> 
<p>Series3/185-55</p> 	<p>Series3/185-50</p> 	<p>Series3/185-45</p> 	<p>Series3/165-55</p> 
<p>Series3/165-50</p> 	<p>Series3/165-45</p> 		

(2) 単位容積質量

図 3.2 に EFS 置換率と単位容積質量の関係を示す。EFS 置換率の増加に伴い単位容積質量は直線的に増加し、EFS 置換率 100%において単位容積質量は 2700kg/m³ 程度となった。

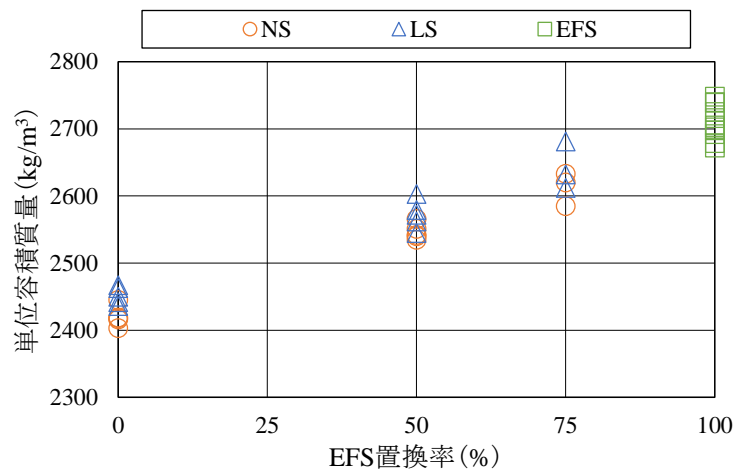
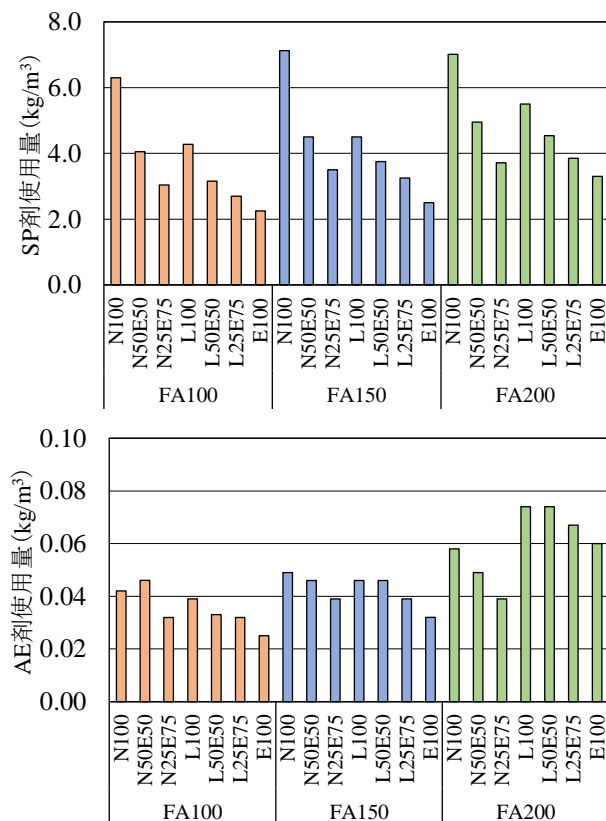


図 3.2 EFS 置換率と単位容積質量の関係

(3) 混和剤使用量

図 3.3 (a)～(c) に、所要の性能（目標スランプフロー65cm，目標空気量 4.5%）を得るために必要な SP 剤，AE 剤の使用量を実験シリーズ別にそれぞれ示す。水セメント比，単位水量を一定とし，FA 混入量を 100，150，200kg/m³（単位粉体量 450，500，550kg/m³）と調整した実験シリーズ 1 では，EFS 置換率の増大に伴い SP 剤，AE 剤使用量ともに大幅に減少した。EFS はガラス質で粒子形状が丸く適度な粒度分布を有しているため，コンクリートの流動性状および空気連行性が改善され，SP 剤，AE 剤の低減に寄与したと思われる。一方で，FA 混入量の増加に伴い SP 剤，AE 剤使用量ともに増加した。これは，総粉体量が増加することで粘性が増大したことと，FA 中に含まれる未燃炭素が AE 剤を吸着し，コンクリートの空気連行を阻害したことが影響し，SP 剤と AE 剤使用量の増加に繋がったと考えられる。また，



(a) シリーズ 1

NS に比べ、LS の方が SP 剤使用量を低減できた。LS は他の岩種のものと比較し、同一の流動性を得るために必要な単位水量を低減できることが確認されており²⁸⁾、単位水量一定とした本実験においても同様の傾向を示した。単位粉体量、単位水量を一定とした実験シリーズ 2 では、水セメント比の増大に伴い SP 剤使用量は減少し、AE 剤使用量は若干増加傾向を示した。単位粉体量一定の条件では、水セメント比が大きくなると総粉体に占める FA の割合が増加する。前述したように、FA に含まれる未燃炭素は AE 剤を吸着するため、AE 剤使用量は増加した。一方で、FA を使用することでワーカビリティが改善され、単位水量一定とした条件では、SP 剤の低減に繋がったと考えられる。未燃炭素を多く含む FA を使用した場合、SP 剤等の分散剤についても吸着する可能性があることが指摘されている¹⁴⁾が、本研究で使用した FA は JIS に適合するものであり、未燃炭素による分散剤吸着への影響は小さかったといえる。また、EFS 置換率が増加すると SP 剤、AE 剤ともに使用量は減少した。単位粉体量一定、細骨材を EFS のみとし、水セメント比および単位水量を調整した実験シリーズ 3 では、単位水量の低減に伴い SP 剤、AE 剤ともに使用量は若干増加した。単位粉体量一定の条件では、単位水量が小さくなると総粉体に占める FA の割合が増加するため、AE 剤の使用量増加に繋がった。また、水セメント比の増大に伴い SP 剤使用量は減少し、AE 剤使用量は増加傾向を示した。図 3.4 に、FA 混入量と AE 剤使用量の関係を示す。FA 混入量の増加に伴い AE 剤使用量は直線的に増加した一方で、EFS 置換率の増大に伴い AE 剤使用量は減少傾向を示した。

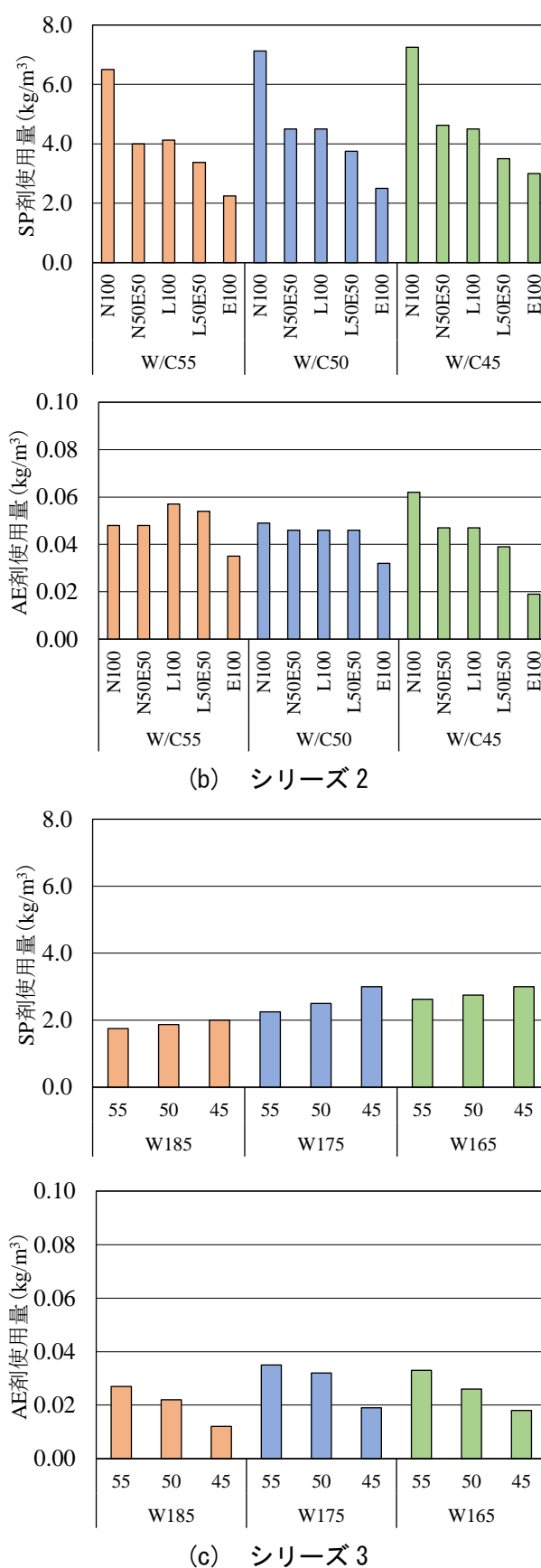


図 3.3 混和剤使用量（上：SP 剤 下：AE 剤）

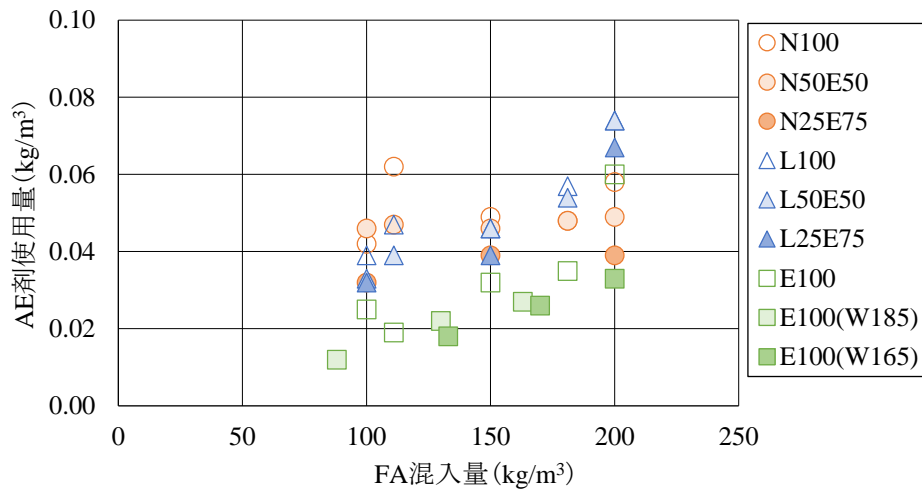
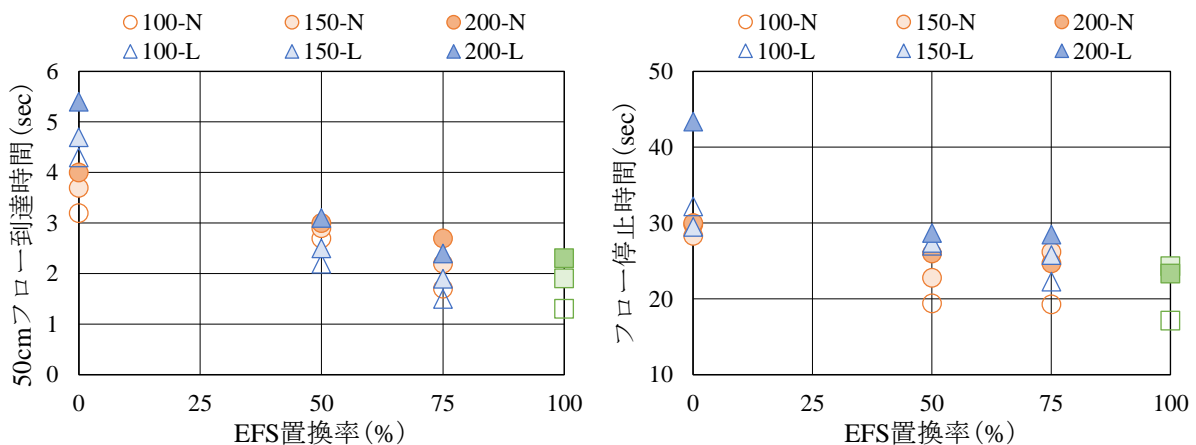


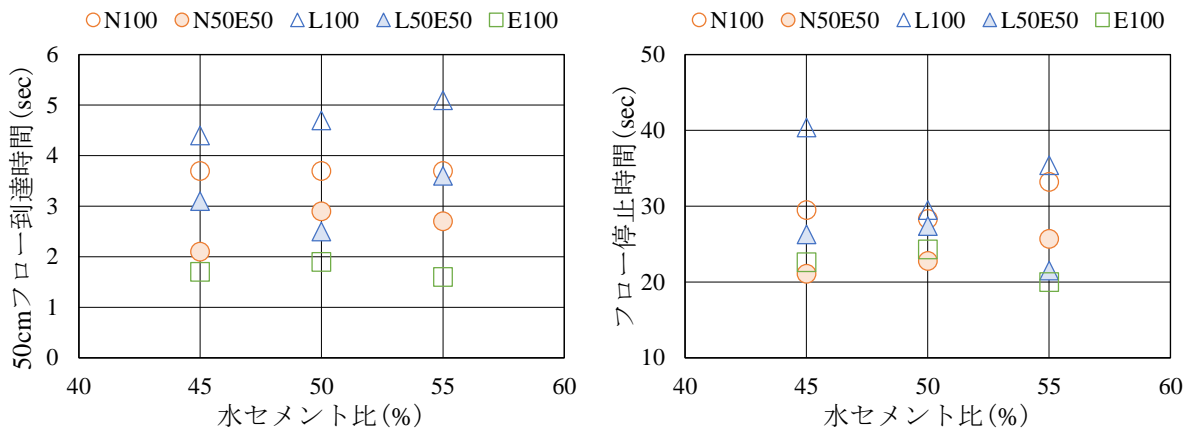
図 3.4 FA 混入量と AE 剤使用量

(4) 50cm フロー到達時間とフロー停止時間

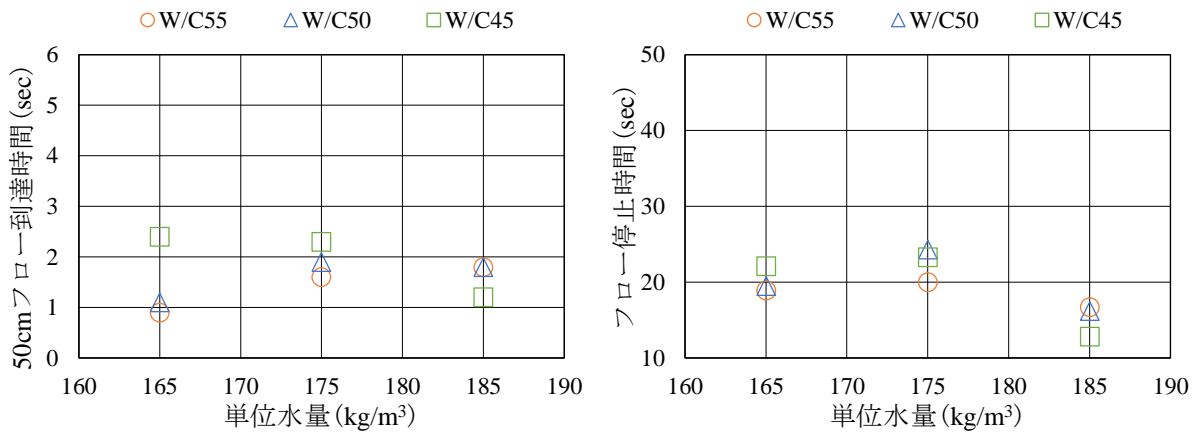
図 3.5 (a)～(c) に、50cm フロー到達時間およびフロー停止時間の関係を実験シリーズ別に示す。実験シリーズ 1 の結果より、細骨材種別に関わらず、EFS 置換率の増加に伴いフロー到達時間、停止時間ともに直線的に減少した。これは、EFS 自体が滑らかで球形に近いことから、EFS 置換率の増大に伴い流動性が向上し、粘性が改善されたものと考えられる。一方で、FA 混入量の増加に伴いフロー到達時間、停止時間は増加傾向を示した。これは、総粉体量の増加により粘性が増大したためと思われる。また、NS に比べ、LS の方が 50cm フロー到達時間、フロー停止時間は増大した。LS は、製造する際に破砕によって生じた石粉を多く含むため粘性が高くなり、流動性が低下したものと考えられる。実験シリーズ 2、実験シリーズ 3 の結果より、水セメント比、単位水量の違いによる 50cm フロー到達時間およびフロー停止時間に明確な傾向は確認できなかった。高流動コンクリートの施工指針²⁾における 50cm フロー到達時間の目安は、障害ランク 2 相当で 3～15 秒である。本実験では、骨材種別、要因に関わらず EFS を 50%以上置換した場合で 50cm フロー到達時間は大幅に減少し、EFS 置換率 75%以上で全て 3 秒以下となった。



(a) シリーズ 1 (EFS 置換率と FA 混入量の影響)



(b) シリーズ 2 (水セメント比の影響)



(c) シリーズ 3 (単位水量の影響)

図 3.5 フロー性状 (左 : 50cm フロー到達時間 右 : フロー停止時間)

(5) V 漏斗流下時間

図 3.6 (a)～(c)に、V 漏斗流下時間の結果を実験シリーズ別に示す。実験シリーズ 1 より、骨材種別に関わらず、EFS 置換率の増大に伴い V 漏斗流下時間は大幅に減少し、EFS を使用することで流動性および間隙通過性に対する改善効果が確認できた。但し、本実験の条件では、EFS 置換率の増大に伴い単位粗骨材かさ容積を小さく設定したため、コンクリート中の粗骨材量が少なくなり、漏斗通過時における粗骨材同士の噛み合わせが緩和されたため、V 漏斗流下時間が減少したことも影響したと考えられる。FA の影響として、混入量の増加に伴い粘性が高くなり、V 漏斗流下時間は増大した。また、LS に付着する石粉が影響し、LS の方が NS に比較し V 漏斗流下時間は増大した。単位粉体量、単位水量を一定とした実験シリーズ 2 では、水セメント比の違いに関わらず V 漏斗流下時間はほぼ同程度の値を示した。実験シリーズ 3 より、単位水量の増加に伴い V 漏斗流下時間は減少した。本結果より、骨材種別、配合要因に関わらず EFS を 50%以上置換した場合で V 漏斗流下時間は大幅に減少し、高流動コンクリートの施工指針²⁾における V 漏斗流下時間の目安である 7～13 秒 (障害ランク 2 相当) の範囲にあった。また、EFS 置換率 100%の条件では、材料分離することなく V 漏斗流下時間 7 秒以下となる配合も存在した。

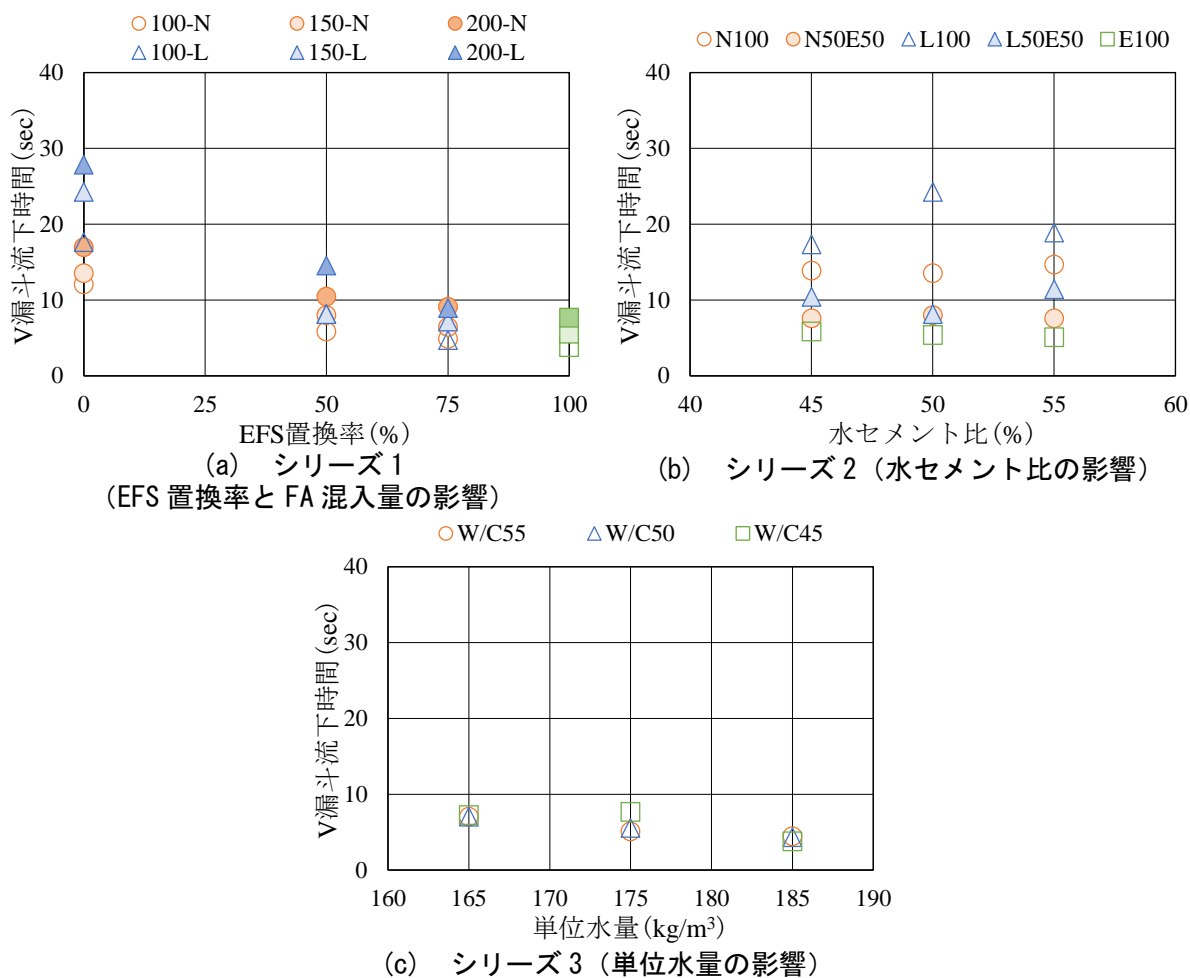
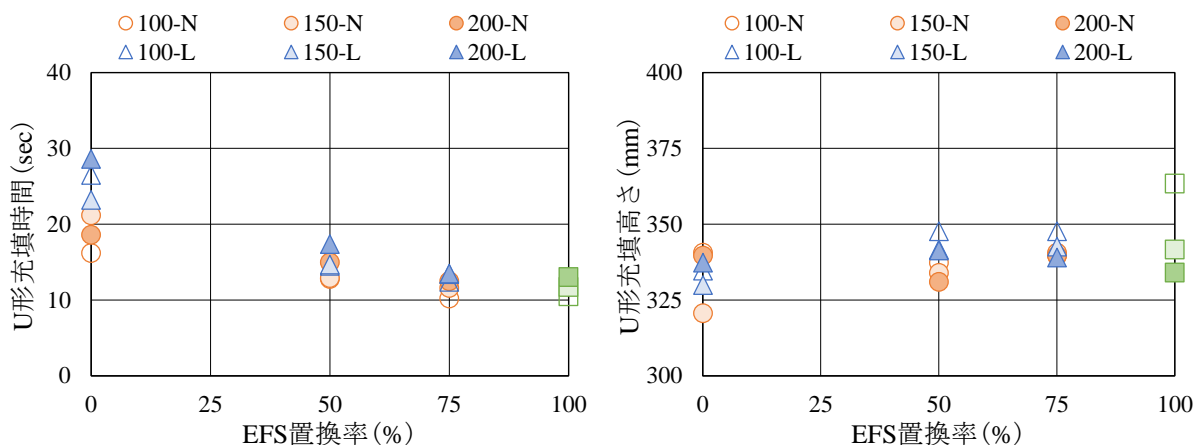


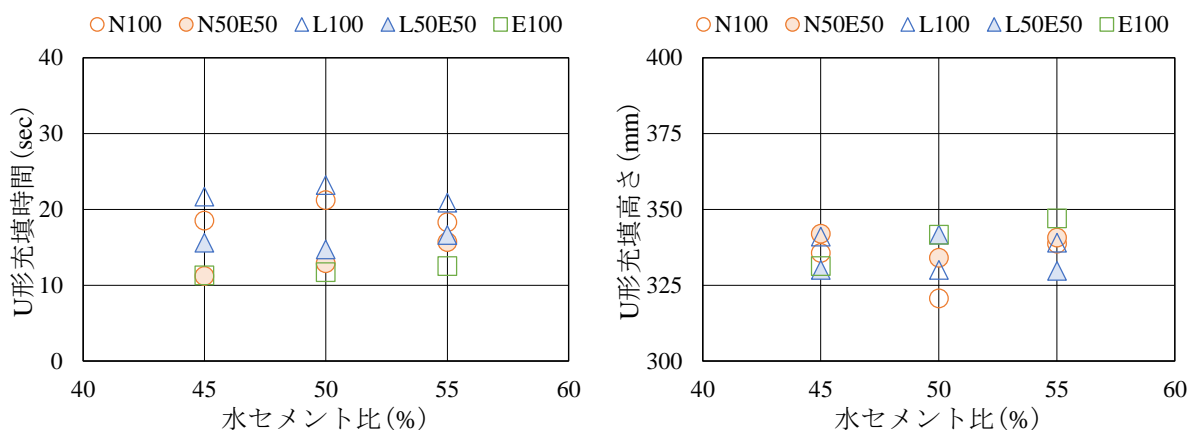
図 3.6 V 漏斗流下時間

(6) U 形充填時間および充填高さ

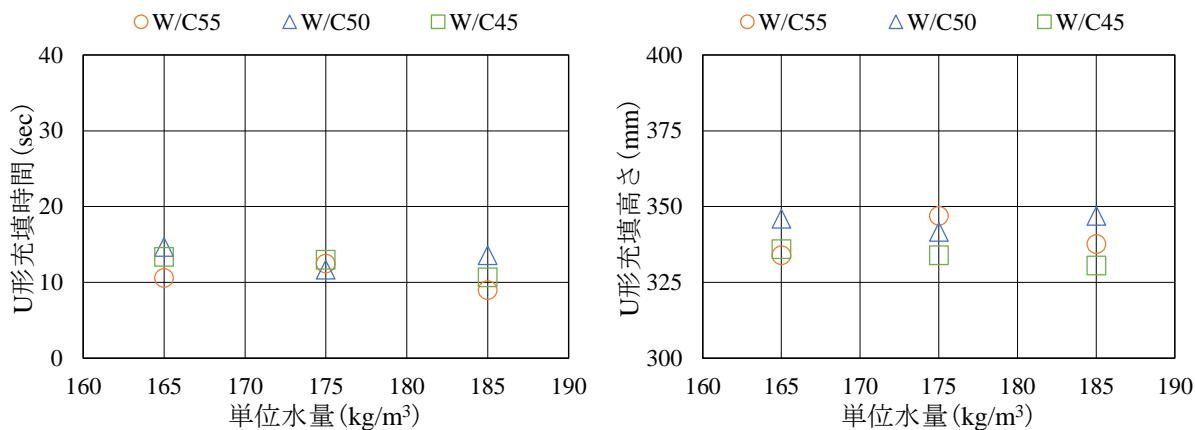
図 3.7 (a)～(c)に、U 形充填時間および充填高さの関係を実験シリーズ別に示す。U 形充填装置は、ボックス形と異なり底部が半円形のため、A 室と B 室が完全に等しい容量になるときの平衡高さは 355mm になる。これに対して、ボックス形は 340mm である。実験シリーズ 1 より、細骨材種別に関わらず、EFS 置換率の増大に伴い U 形充填時間は減少し、EFS を使用することにより間隙通過性が向上したが、EFS 置換率が 75% を超える条件では U 形充填時間に大きな差はみられなかった。また、EFS 置換率の増加に伴い U 形充填高さは増加し、EFS 置換率 75% 以上で平衡高さ (355mm) 付近まで充填した。FA 混入量 100kg/m^3 、EFS 置換率 100% の条件では U 形充填高さ 363mm と平衡高さを超えて充填したが、これは粉体量が少ないことで粘性が低下し、コンクリートが B 室側へ勢いよく流入したことによるものと推察される。また、全ての配合で充填高さ 300mm 以上を満足し、高流動コンクリートの施工指針²⁾におけるランク 2 相当の自己充填性を有することが認められた。但し、EFS 置換率の増大に伴い単位粗骨材かさ容積を小さく配合設計したため、コンクリート中の粗骨材量が少なくなり、間隙通過性が向上したことも影響したと考えられる。実験シリーズ 2、実験シリーズ 3 の結果より、水セメント比、単位水量の違いに関わらず、U 形充填時間および U 形充填高さは同程度の値を示した。



(a) シリーズ 1 (EFS 置換率比較)



(b) シリーズ 2 (水セメント比比較)



(c) シリーズ 3 (単位水量比較)

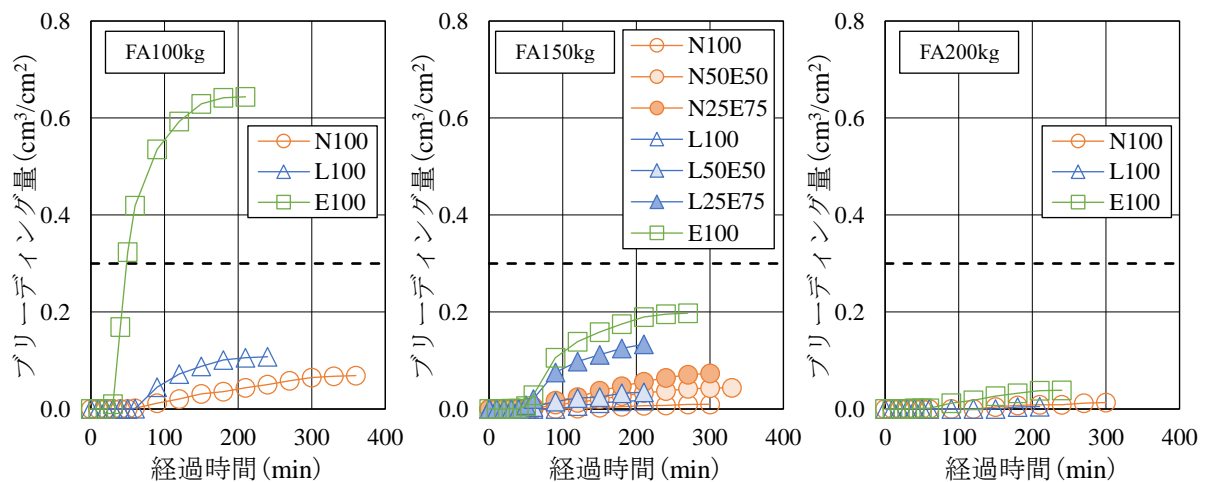
図 3.7 充填性状 (左 : U 形充填時間 右 : U 形充填高さ)

(7) ブリーディング

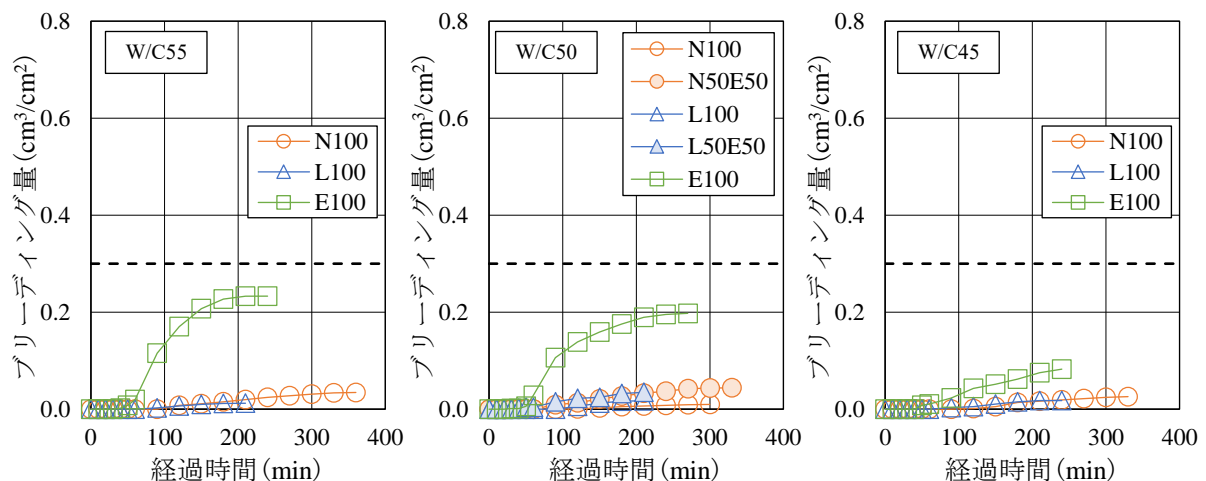
図 3.8(a)~(c)に、各種配合要因とブリーディング量の関係を示す。なお、ブリーディング量の目安として JASS5 凍結融解作用を受けるコンクリート²⁹⁾を参考に、図中に破線で示した。実験シリーズ 1 において、EFS 置換率の増加にブリーディング量は増加したが、FA 混入量を増加することでブリーディング量は大幅に低減できた。前者は、EFS の表面がガラス質で吸水率が小さいこ

とによる保水性低下や、EFS 置換率の増大に伴い骨材全体の密度が大きくなり骨材相に作用する鉛直下向きの力がより大きくなったことに起因し、後者は、粉体量を増加することによる自由水の移動制限やフレッシュコンクリートの保水性向上によるものと考えられる。また、FA 混入量 100kg/m^3 、EFS 置換率 100%の条件では、ブリーディング量の規定値 $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ を大幅に上回った。単位粉体量、単位水量を一定とした実験シリーズ 2 では、水セメント比の増大に伴いブリーディング量は増加した。単位粉体量一定の条件では、水セメント比が大きくなると総粉体に占める FA の割合が増加するため、拘束されない遊離水がブリーディング水となってコンクリート表面に浸み出したと考えられる。一方で、いずれの条件においてもブリーディング量の規定値を下回った。細骨材として EFS を 100%置換した実験シリーズ 3 では、単位水量 185kg/m^3 の条件でブリーディング量の規定値を上回ったが、単位水量を低減することによりブリーディング量の発生を大幅に抑制できた。

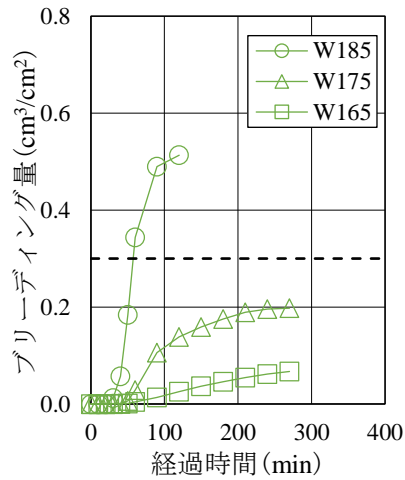
以上のことから、EFS の多量置換を目的とした場合、粉体量の少ない条件では単位水量を低減し、単位水量の多い条件では粉体量を増加する等の処置を行えば、ブリーディング量の規定値を十分に満足するといえる。



(a) シリーズ 1 (FA 混入量の影響)



(b) シリーズ 2 (水セメント比の影響)



(c) シリーズ3 (単位水量の影響)

図 3.8 各種配合要因とブリーディング量の関係

(8) 各指標相互関係

フレッシュ性状における各指標間の相互関係を図 3.9 に示す。50cm フロー到達時間、フロー停止時間の増大に伴い V 漏斗流下時間、U 形充填時間は増大する傾向を示し、各指標間には高い相関性が認められた。また、この関係は骨材種別に依存しない。50cm フロー到達時間と U 形充填高さの関係より、50cm フロー到達時間に関わらず充填高さはほぼ同等であった。また、LS, NS, EFS の順に 50cm フロー到達時間、フロー停止時間および V 漏斗流下時間は増大した。

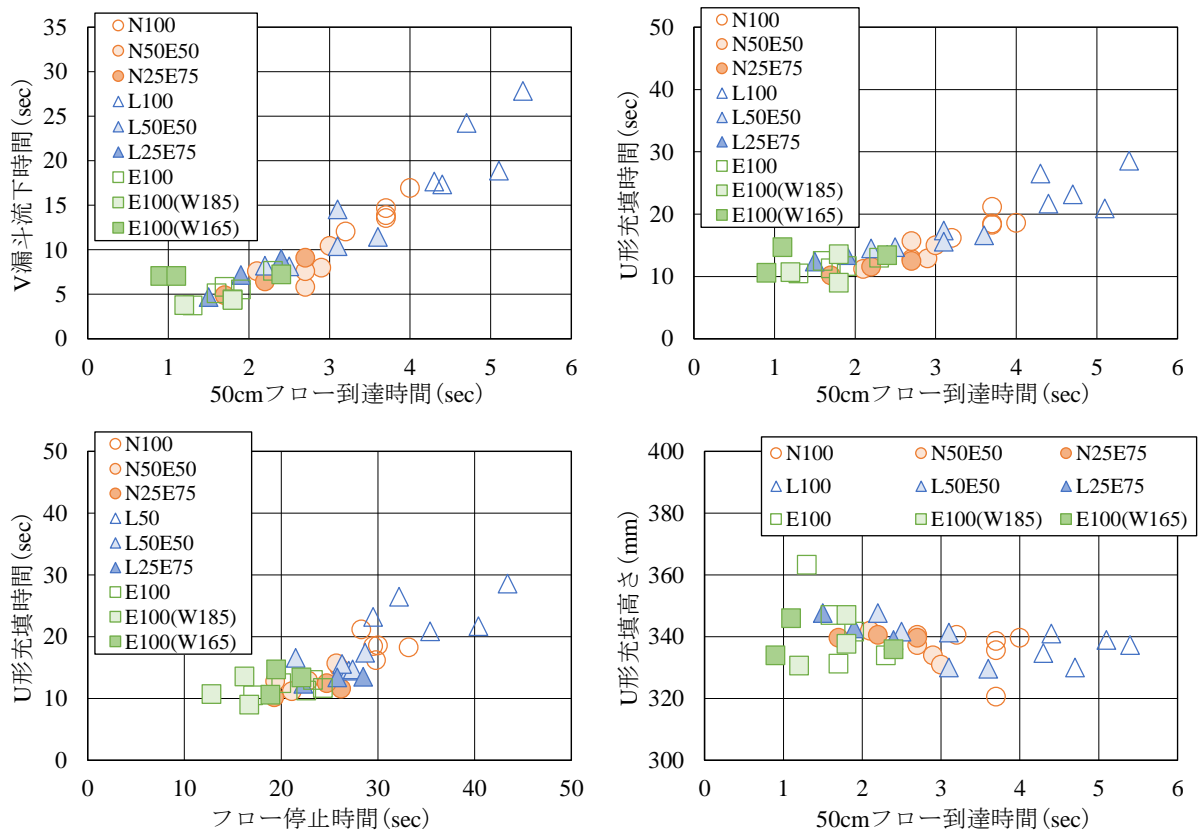


図 3.9 各フレッシュ指標間相互関係

3.3.2 硬化コンクリートの性状

(1) 圧縮強度

図 3.10 (a)～(c) に、圧縮強度試験の結果一覧を、図 3.11 (a)～(c) に材齢と圧縮強度の関係 (NS, LS, EFS 単味) を実験シリーズ別に表示す。水セメント比, 単位水量を一定とし, FA 混入量を 100, 150, 200kg/m³ (単位粉体量 450, 500, 550kg/m³) と調整した実験シリーズ 1 では, 細骨材種別に関わらず, EFS 置換率の増大に伴い圧縮強度は各材齢で直線的に低下した。これは, EFS 自体が滑らかで粒子形状が丸いため, セメントペーストとの付着力が低下したためと考えられる。また, FA 混入量の増加に伴い各材齢における圧縮強度は増加した。水セメント比一定の条件下では, FA を混入することによるフィラー効果によりコンクリートの組織が緻密化し, 強度が増加したものと考えられる。実験シリーズ 2 の結果より, 細骨材種別に関わらず, 材齢 28 日までの圧縮強度は水セメント比の低下に伴い増加したが, 材齢 91 日では水セメント比 55%で同等か増加している。単位粉体量, 単位水量一定の条件下では, 水セメント比が大きくなると総粉体に占める FA の割合が増加するため, FA のポズラン反応が強度増進に寄与したものと考えられる。単位粉体量一定, 細骨材を EFS のみとし, 水セメント比および単位水量を調整した実験シリーズ 3 より, 単位水量の低減に伴い圧縮強度は各材齢で増加した。単位粉体量一定の条件下では, 単位水量が小さくなると総粉体に占める FA の割合が増加するため, フィラー効果によるコンクリート組織の緻密化とポズラン反応により材齢初期から長期に至るまで強度発現に効果があったと考えられる。

以上のことから, EFS を置換することにより圧縮強度は低下傾向を示したが, 粉体系高流動コンクリートの特徴でもある低水結合材比の影響によりコンクリートの組織が緻密化され, 強度低下割合は 10%程度と比較的小さかった。また, FA を混入することによる長期強度の増進についても見込める結果となった。

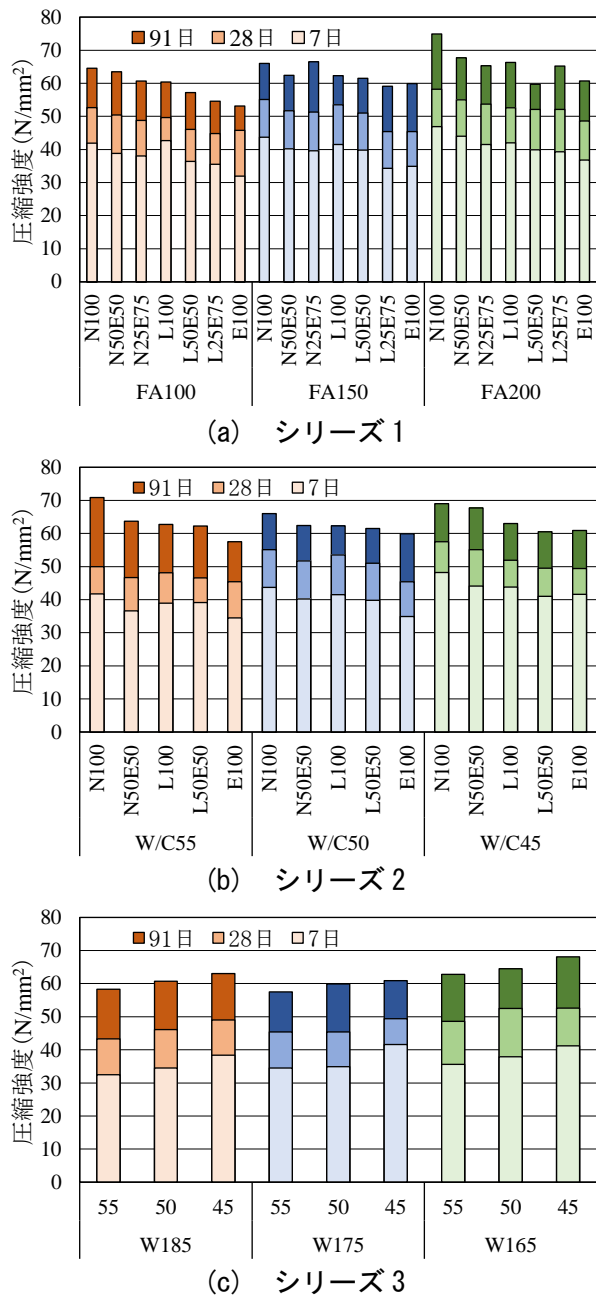


図 3.10 圧縮強度

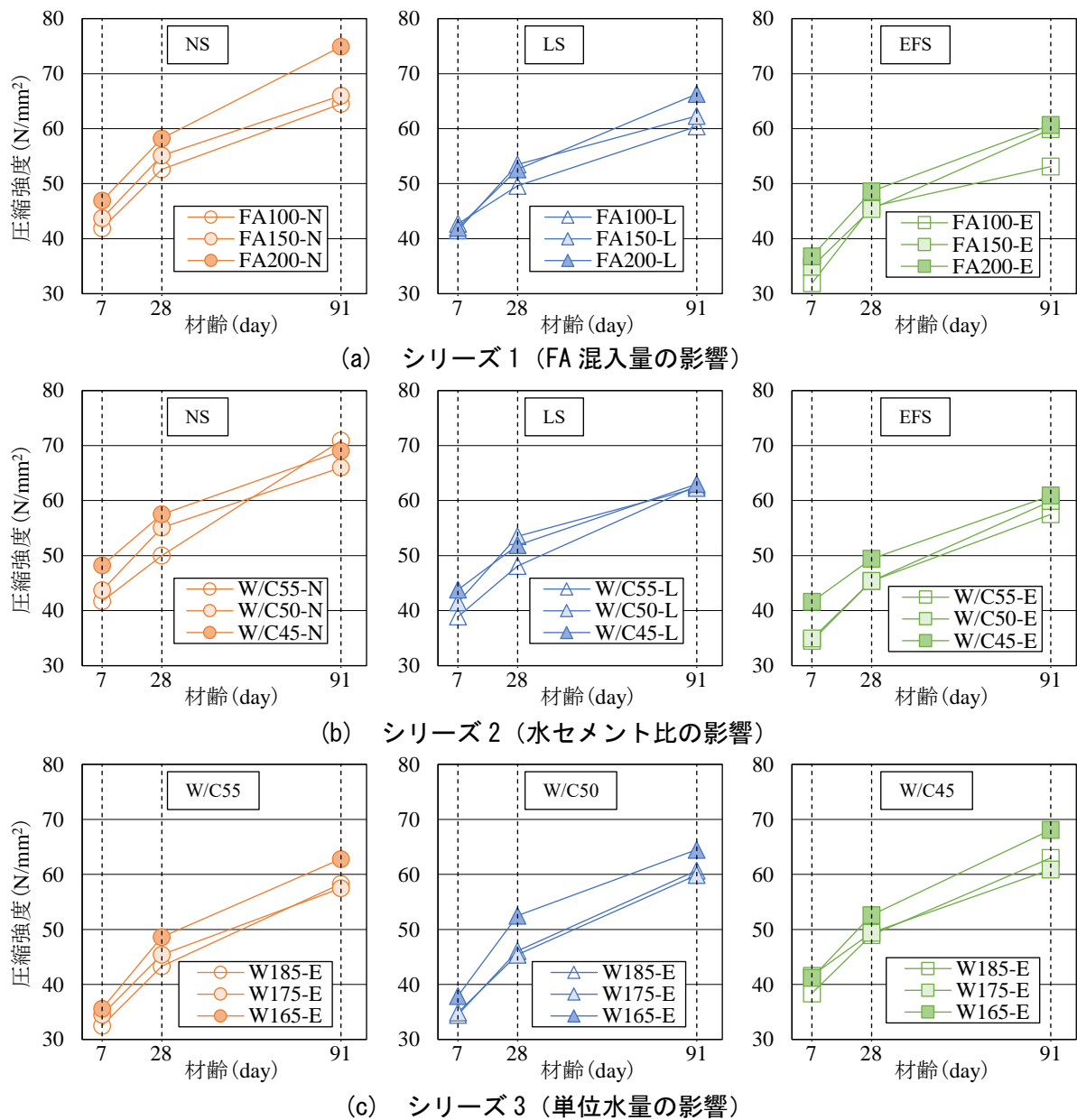


図 3.11 各種配合要因における材齢と圧縮強度の関係

(2) 静弾性係数

コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を図 3.12 に示す。参考のため、土木学会の標準式方書の式³⁰⁾を実線で、単位容積質量を $2.4t/m^3$ とした New RC 式²⁹⁾を破線で示す。EFS を 100% 置換した場合、圧縮強度は小さくなったが、静弾性係数は他の骨材と比較して最も大きな値を示した。一般に、骨材の弾性係数が大きく、コンクリートの単位容積質量が大きいほど静弾性係数は大きい値を示すが、本実験においても同様の傾向が認められ、EFS 自体の特徴が顕著に表れたものと考えられる。材齢で比較すると、材齢の進行に伴い圧縮強度は増加するが、静弾性係数は圧縮強度の増加に比例するほど増加しなかった。また、EFS 置換による単位容積質量の増加程度については、3.3.1(1)図 3.2 に示した通りである。

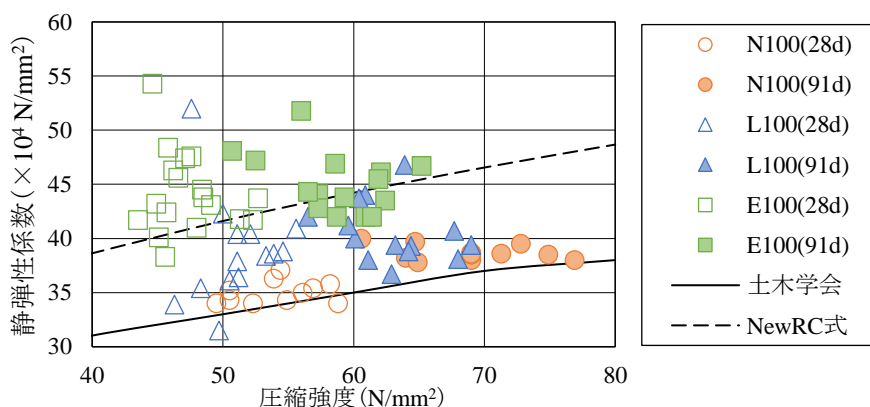
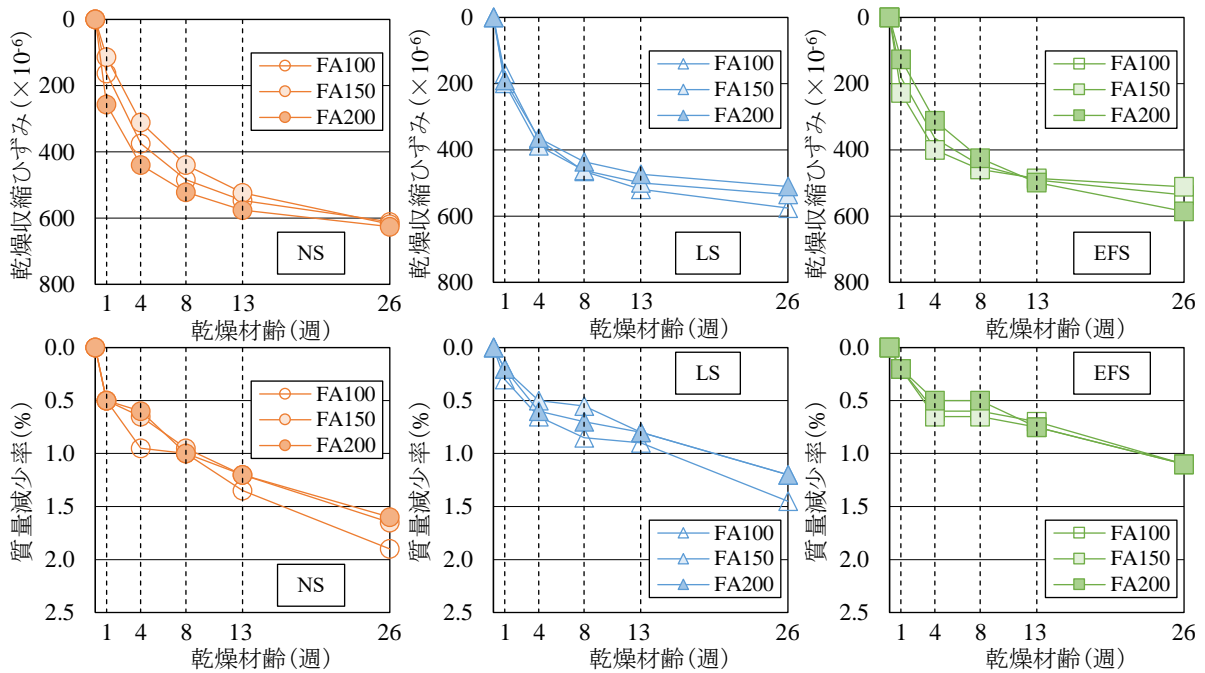


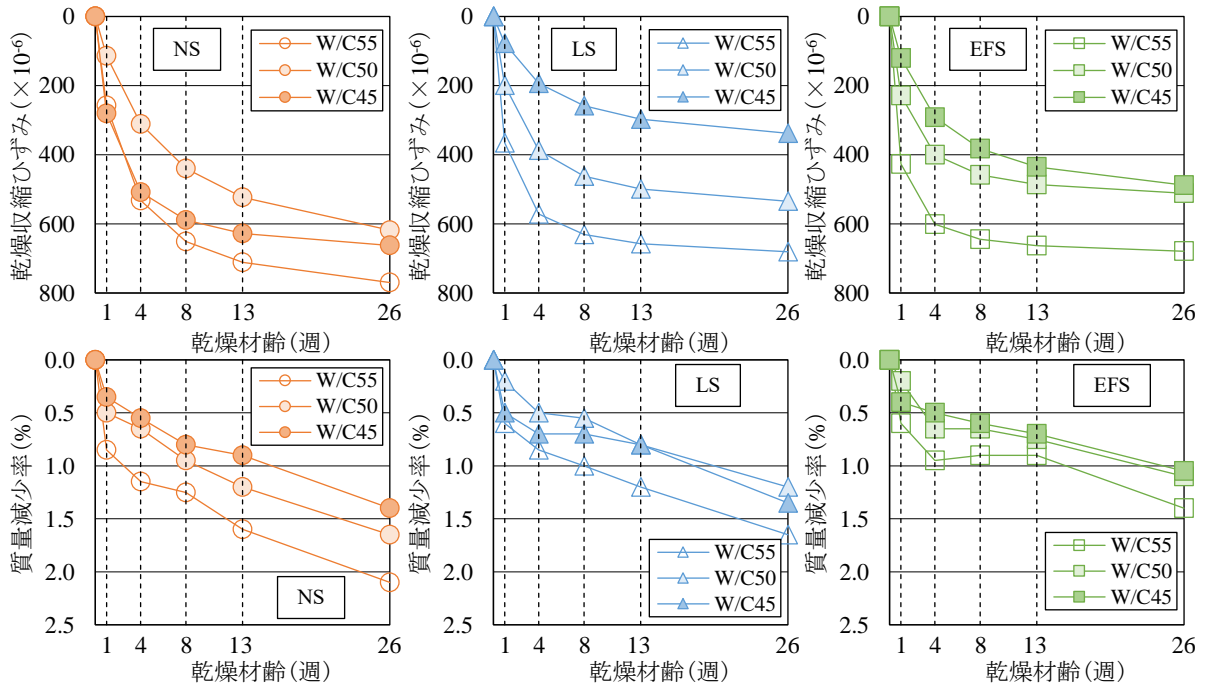
図 3.12 圧縮強度と静弾性係数の関係

(3) 乾燥収縮 (JIS 法)

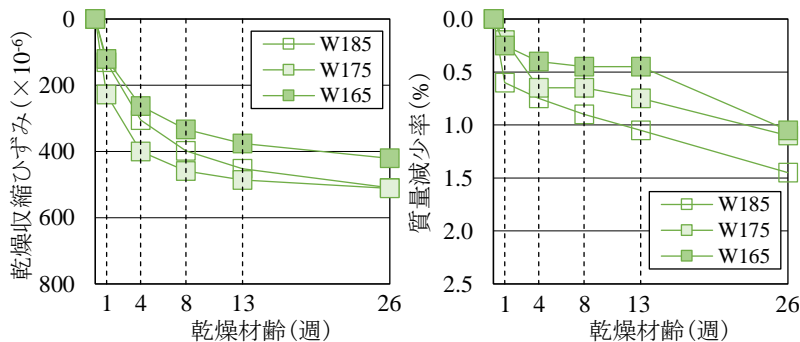
図 3.13(a)～(c)に、乾燥収縮ひずみ、質量減少率と材齢の関係を実験シリーズ別を示す。水セメント比、単位水量を一定とし、FA 混入量を調整した実験シリーズ 1 では、細骨材種別に関わらず、FA 混入量の増加に伴い質量減少率は減少したが、乾燥収縮ひずみに顕著な相違は認められなかった。一方で、細骨材として EFS を 100%使用した配合は、FA 混入量の違いに関わらず、乾燥収縮ひずみ、質量減少率ともに他の細骨材と比較して小さくなった。これは、硬質且つ緻密な EFS がセメントペースト部の収縮を拘束する効果と、他の細骨材に比べ吸水率の小さい EFS 内部からの自由水の逸散が低減され、より緻密なセメントペーストが形成されたことに起因すると考えられる。実験シリーズ 2 より、水セメント比の増大に伴い乾燥収縮ひずみ、質量減少率ともに大きくなった。一般に、単位水量を一定とした場合、水セメント比の増大に伴って単位セメント量が減少した分だけ骨材量が増加する。骨材の乾燥収縮ひずみは、セメントペーストに比べて小さいため、骨材が相対的にセメントペーストの収縮を拘束する役割を担うことになる。本実験シリーズ 2 では、単位粉体量および単位水量を一定としたため、水セメント比の増減に関わらず骨材量に大きな差は生じない。つまり、水セメント比の増大に伴う乾燥収縮ひずみ、質量減少率の増大は、水和に寄与しない自由水の増加が影響していると推察される。単位水量を調整した実験シリーズ 3 では、単位水量の低減に伴い乾燥収縮ひずみ、質量減少率ともに減少した。水セメント比が一定の場合、単位水量を低減するとコンクリート中のセメントペースト量が減少した分だけ骨材量が増加し、それに応じた収縮拘束効果が生じる。本実験シリーズ 3 では、単位粉体量を一定としたため、単位水量の違いに関わらず骨材量に大きな差は生じていない。つまり、単位水量の低減に伴い水粉体比が小さくなったことにより、コンクリートの組織が緻密になり、乾燥収縮ひずみ、質量減少率の減少に繋がったと考えられる。図 3.14(a)～(c)に、乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係を実験シリーズ別を示す。質量減少率が小さくなると乾燥収縮ひずみも小さくなる傾向が確認でき、コンクリート中の自由水の逸散と乾燥収縮には相関性があるといえる。また、乾燥収縮ひずみ、質量減少率ともに EFS, LS, NS の順に概ね小さくなっており、硬質且つ緻密な EFS は乾燥収縮の低減に効果があると考えられる。いずれにしても、全ての配合で日本建築学会・収縮ひび割れ指針 (案)³¹⁾に示されたコンクリートに対する設計値 800×10^{-6} 以下を満足した。



(a) シリーズ 1 (FA 混入量の影響)



(b) シリーズ 2 (水セメント比の影響)



(c) シリーズ 3 (単位水量の影響)

図 3.13
乾燥収縮ひずみ, 質量減少率
と材齢の関係 (JIS 法)

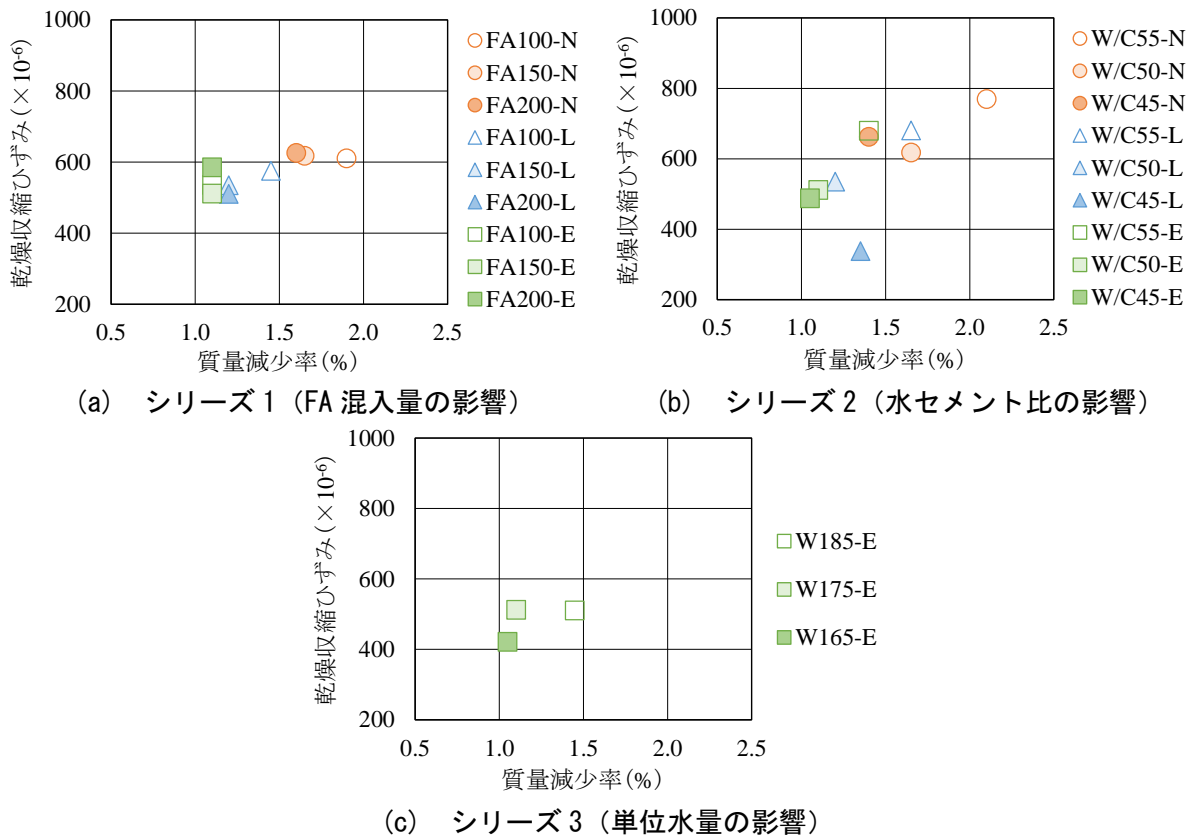
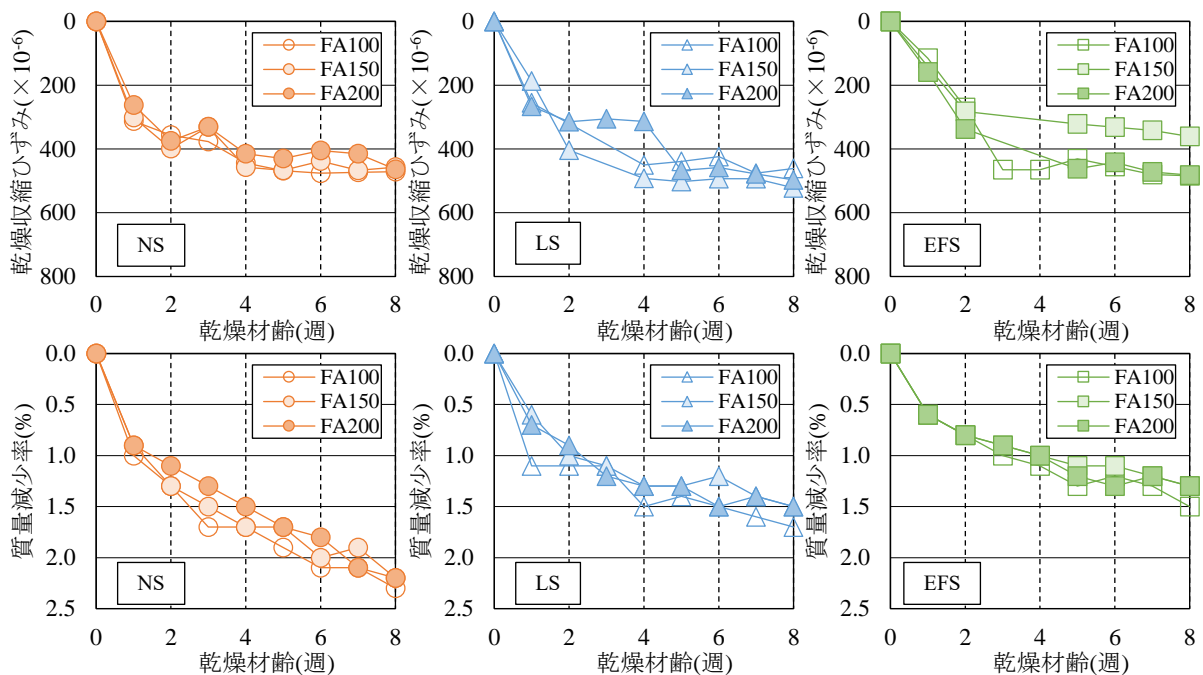


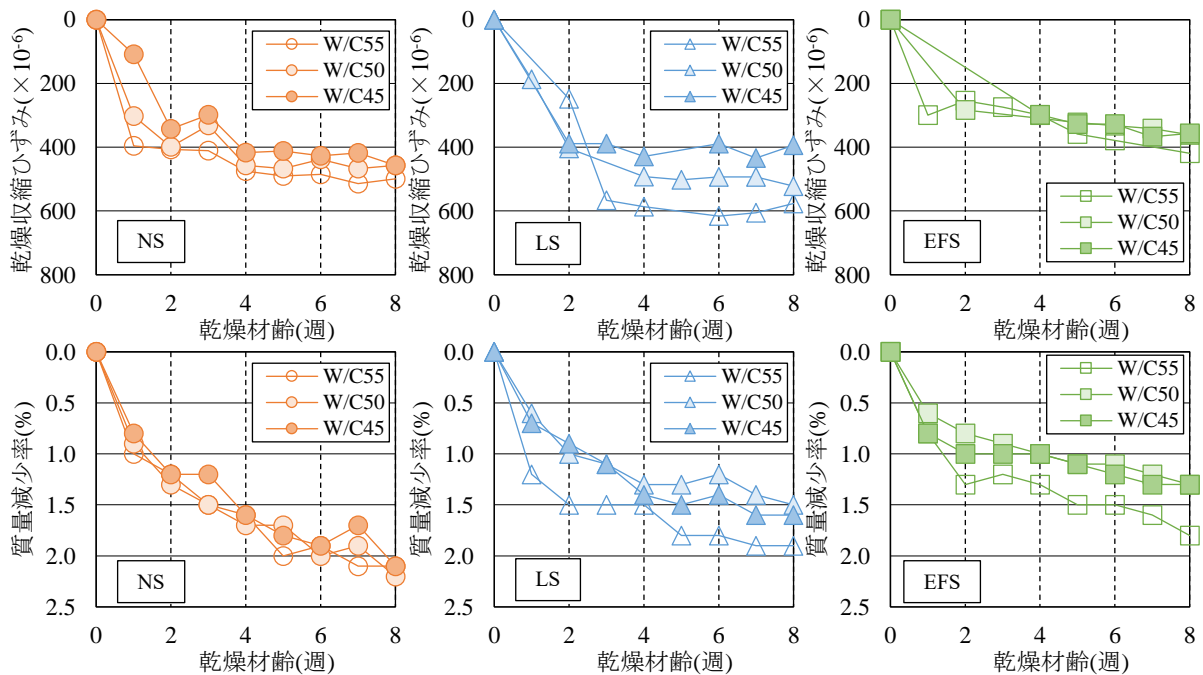
図 3.14 乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係 (JIS 法)

(4) 乾燥収縮 (迅速法)

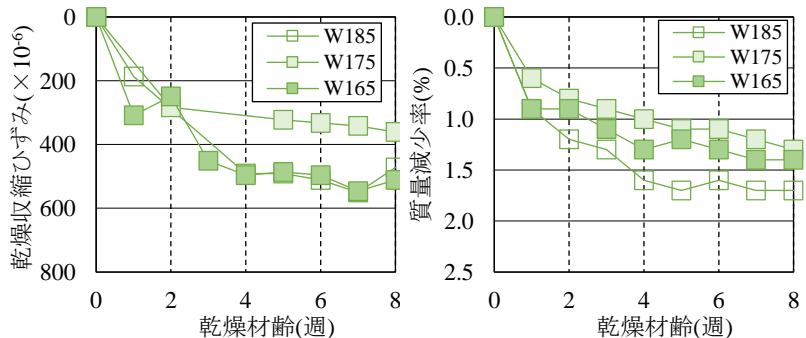
図 3.15(a)～(c)に、乾燥収縮ひずみ、質量減少率と材齢の関係を実験シリーズ別を示す。水セメント比、単位水量を一定とし、FA 混入量を調整した実験シリーズ 1 では、細骨材種別に関わらず、FA 混入量の増加に伴い質量減少率は減少したが、乾燥収縮ひずみに顕著な相違は認められなかった。一方で、細骨材として EFS を 100%使用した配合は、FA 混入量の違いに関わらず、乾燥収縮ひずみ、質量減少率ともに他の細骨材と比較して小さくなった。これは、JIS 法と同様の結果である。単位粉体量、単位水量を一定とした実験シリーズ 2 では、水セメント比の増大に伴い乾燥収縮ひずみ、質量減少率ともに大きくなり、JIS 法と同様の結果を示した。単位粉体量を一定とし、水セメント比、単位水量を調整した実験シリーズ 3 では、単位水量の低減に伴い乾燥収縮ひずみ、質量減少率ともに減少した。また、材齢 8 週における乾燥収縮ひずみは概ね収束しており、乾燥収縮期間の短縮を目的とした迅速法を用いることで、JIS 法における長期乾燥収縮ひずみを予測できることが示唆された。図 3.16(a)～(c)に、乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係を実験シリーズ別を示す。質量減少率が小さくなると乾燥収縮ひずみも小さくなる傾向が確認でき、コンクリート中の自由水の逸散と乾燥収縮には迅速法においても相関性があるといえる。また、乾燥収縮ひずみ、質量減少率ともに EFS, LS, NS の順に概ね小さくなっており、硬質且つ緻密な EFS は乾燥収縮の低減に効果があると考えられる。いずれにしても、全ての配合で日本建築学会・収縮ひび割れ指針 (案)³¹⁾に示されたコンクリートに対する設計値 800×10^{-6} 以下を満足した。



(a) シリーズ 1 (FA 混入量の影響)



(b) シリーズ 2 (水セメント比の影響)



(c) シリーズ 3 (単位水量の影響)

図 3.15
乾燥収縮ひずみ, 質量減少率
と材齢の関係 (迅速法)

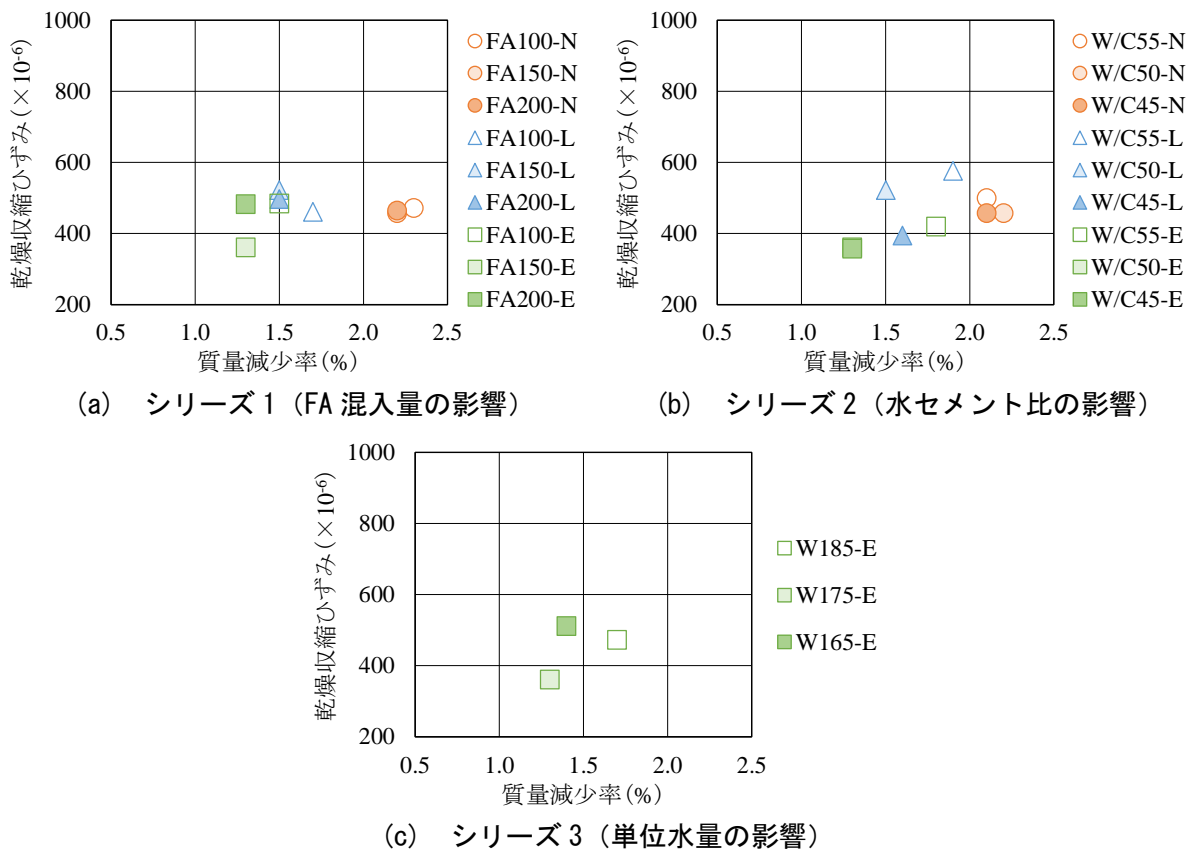


図 3.16 乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係（迅速法）

(5) 乾燥収縮（JIS 法と迅速法の比較）

JIS 法と迅速法の相関性について、図 3.17 に乾燥収縮ひずみの関係を、図 3.18 に質量減少率の関係を示す。乾燥収縮ひずみは JIS 法より迅速法の方が小さく、質量減少率は JIS 法より迅速法の方が大きくなった。井上ら²⁵⁾は、コンクリートの乾燥収縮特性を迅速法によって安全側に評価できると報告している。本実験では、質量減少率において既往の知見と同様の傾向が確認できたが、乾燥収縮ひずみにおいては確認できなかった。この原因については不明であるが、JIS 法と迅速法の結果には高い相関性が認められるため、計測開始時の人的要因が影響したものと考えられる。

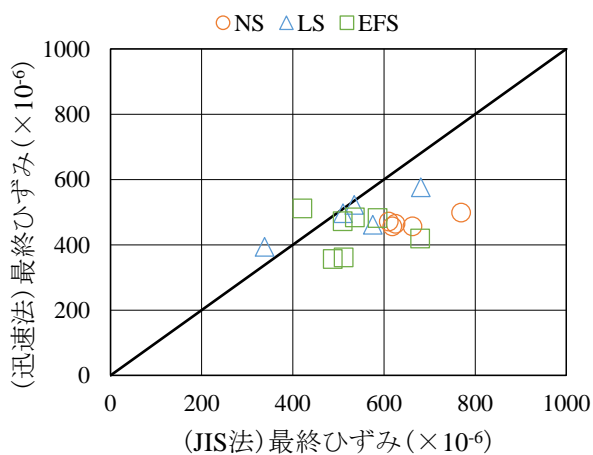


図 3.17 乾燥収縮ひずみ

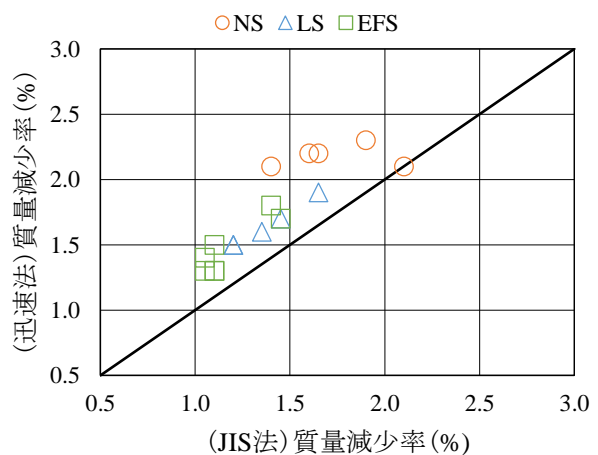


図 3.18 質量減少率

(6) 凍結融解抵抗性

急速凍結融解試験の結果を図 3.17 に示す。JASS5 凍結融解作用を受けるコンクリート²⁹⁾によれば、JIS A 1148 によるコンクリートの凍結融解試験において、300 サイクルにおける相対動弾性係数 85%以上を標準的な値としている。一方、同解説によれば相対動弾性係数 60%以上の場合で十分な耐凍害性を有するとある。試験方法は異なるものの、今回実施した供試体は全て相対動弾性係数 60%以上を満足し、良好な凍結融解抵抗性を有しているといえる。また、FA 混入量、細骨材種別、単位水量の違いによる相対動弾性係数に特筆すべき有意な差は認められなかった。EFS 置換率の増加に伴うブリーディング量の増大は凍結融解抵抗性の低下を招くとの報告⁵⁾もあるが、本実験における EFS100%置換した条件では空気量 4%以上を確保できており、凍結融解抵抗性に与える影響は小さかったものと推察される。

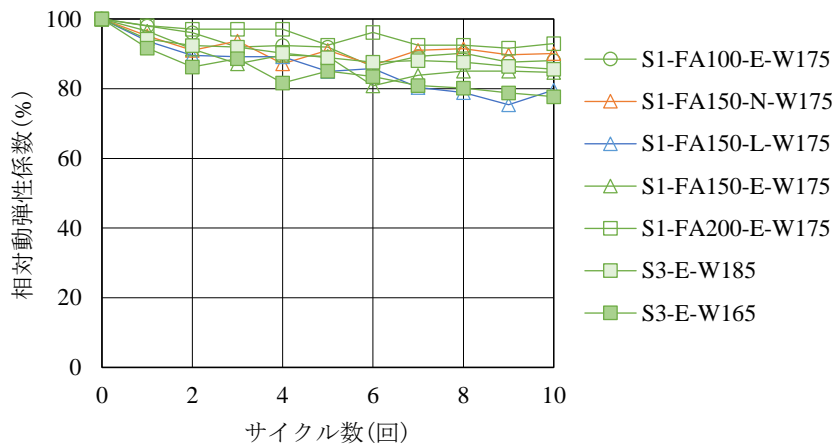


図 3.17 サイクル数と相対動弾性係数の関係

第4章 混和材の種類が粉体系高流動モルタルの塑性粘度に与える影響評価

4.1 はじめに

高流動コンクリートの普及には多くの障害がある。その一つに混和材の種類によってコンクリートのフレッシュ性状が大きく異なり、多くの試し練りを必要とする点がある。スランプフローとスランプフロー速度で評価することができ、これらの指標はフレッシュコンクリートをビンガム流体と仮定したときのレオロジー定数（降伏値、塑性粘度）に大きく関連している。スランプフローは降伏値に依存するため、高性能減水剤の使用量によって制御することは可能であるが、塑性粘度の制御は難しい。本章では、比表面積が大きく異なる4種類の混和材を使用し、高性能減水剤の使用量により高流動モルタルのゼロ打フローを一定にし、混和材の種類や単位量が塑性粘度に与える影響についてB型粘度計を用いて評価した。

4.2 実験概要

4.2.1 使用材料および特性

本実験に使用した材料の物理的性質を表4.1に示す。混和材はフライアッシュII種（以下、FA種）、フライアッシュIV種（以下、FAIV）、強熱減量を1%以下にしたカーボンフリーフライアッシュ（以下、CfFA）、石灰石微粉末（以下、LSP）の4種類とした。FA系3種類は、いずれもJIS A 6201の品質規定に合格するものを用いた。なお、CfFAは前述したJISの品質規定ではFAII種相当であるが、FAの未燃炭素を極限まで低減した改質FAである。LSPは、日本コンクリート工学会より示された「コンクリート用石灰石微粉末品質規格（案）」に適合するものであり、比表面積は4500cm²/g以上と、FA系3種類に比べ最も大きい。また、セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は砂岩系砕砂とした。混和剤は、高流動モルタルの空気量が塑性粘度に及ぼす影響を小さくするために非空気連行性の高性能減水剤とし、AE剤は使用しなかった。

表4.1 使用材料の物理的性質

材料名	記号	種類および物性値
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度：3.16 g/cm ³ ，比表面積：3470 cm ² /g
混和材	FAII	フライアッシュII種 密度：2.30 g/cm ³ ，比表面積：3680 cm ² /g，強熱減量：2.1%
	FAIV	フライアッシュIV種 密度：2.20 g/cm ³ ，比表面積：1980 cm ² /g，強熱減量：1.7%
	CfFA	フライアッシュII種（Carbon-free Fly Ash） 密度：2.29 g/cm ³ ，比表面積：4100 cm ² /g，強熱減量：0.5%
	LSP	石灰石微粉末 密度：2.72 g/cm ³ ，比表面積：4960 cm ² /g
細骨材	S	砂岩系砕砂 表乾密度：2.57 g/cm ³ ，吸水率：1.77%，粗粒率：2.20
混和剤	SP	高性能減水剤 ポリカルボン酸エーテル系

4.2.2 配合要因

本研究の配合要因を表 4.2 に示す。水セメント比 50%，単位水量 185kg/m³ の一定のもと，単位粗骨材かさ容積を 500, 525, 550L/m³ の 3 水準，それぞれに対しモルタル中の細骨材容積比を 42, 45, 48%となるように混和材 4 種類の単位量を決定した。本研究では，この高流動コンクリート 1m³ から粗骨材容積を差し引いた計 36 水準の高流動モルタルを対象とした。SP 剤の使用量は，目標ゼロ打モルタルフローを 270±15mm の範囲に入るように各配合で決定した。したがって，1 配合に対して 1 回以上の試し練りを必要とした。

目標ゼロ打モルタルフローは，事前に JIS A 1150 に規定されるスランプフロー試験で 650mm，JSCE-F 511 の充填試験（障害ランク 2）で充填高さが 300mm 以上を満足する高流動コンクリートの試し練りを行い決定した。目標を満足した高流動コンクリートを 5mm ふるいでウェットスクリーニングし，その高流動モルタルを用いてゼロ打モルタルフロー試験を行い，このフローを適正フローとして選定した。モルタルの配合一覧を表 4.3 に示す。

表 4.2 配合要因

水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位粗骨材かさ容積 (L/m ³)	細骨材容積比 (%)
50	185	500	42
		525	45
		550	48

4.2.3 モルタルの練混ぜ方法

モルタルの練混ぜには，JIS R 5201 に規定されている容量 20L の機械練り用練混ぜ機を用いた。最初にセメント，混和材，水を投入し，練混ぜ機をすぐに低速（自転速度：毎分 140±5 回転，公転速度：毎分 62±5 回転）で 30 秒間始動させた。次に細骨材を加え低速で 30 秒間練混ぜた後，高速（自転速度：毎分 285±10 回転，公転速度：毎分 125±10 回転）にし，引き続き 30 秒間練混ぜた。その後，90 秒間練混ぜを休止し，休止の最初の 15 秒間で練り鉢に付着したモルタルの掻き落としを行った。休止終了後，再び高速で 60 秒間練混ぜを行った後，5 分間の静置を行い，低速で 10 秒間練混ぜた後排出した。5 分間の静置時間を設けた理由は，高性能減水剤の十分なセメント分散効果を引き出すためである。なお，それぞれの段階での操作の開始時間誤差は，±1 秒以内とした。

4.2.4 試験項目および方法

(1) モルタルフロー試験

モルタルフロー試験は，JIS R 5201 に規定されている方法に従い実施した。モルタルが広がった後の径を最大と認める方向と，これに直角な方向とで 1mm 単位まで測定し，その平均値を求めた。なお，前述したとおり，目標ゼロ打モルタルフローは 270±15mm とした。

表 4.3 モルタルの配合一覧

シリーズ名	配合記号	W/C (%)	s/m ^{*1} (%)	Gm ^{*2} (L/m ³)	W/P (%)	単位量 (kg/m ³)								
						W	C	FA II	FAIV	CfFA	LSP	S	SP	
FA II 種	II-1	50	42	500	31.4	266	531	315	-	-	-	1064	10.2	
	II-2			525	32.5	272	544	294	-	-	-	1061	10.1	
	II-3			550	33.8	279	556	267	-	-	-	1064	9.9	
	II-4		45	500	34.1	266	531	248	-	-	-	1139	9.7	
	II-5			525	35.4	272	544	223	-	-	-	1141	9.2	
	II-6			550	36.8	279	556	200	-	-	-	1139	9.1	
	II-7		48	500	37.4	266	531	179	-	-	-	1216	9.2	
	II-8			525	38.8	272	544	159	-	-	-	1213	8.8	
	II-9			550	40.4	279	556	131	-	-	-	1216	8.4	
FAIV 種	IV-1		50	42	500	31.9	266	531	-	301	-	-	1064	10.0
	IV-2				525	33.0	272	544	-	277	-	-	1067	9.4
	IV-3				550	34.3	279	556	-	255	-	-	1064	9.1
	IV-4			45	500	34.5	266	531	-	238	-	-	1139	9.4
	IV-5				525	35.8	272	544	-	218	-	-	1139	9.0
	IV-6				550	37.1	279	556	-	191	-	-	1139	8.6
	IV-7			48	500	37.8	266	531	-	172	-	-	1216	9.1
	IV-8				525	39.1	272	544	-	152	-	-	1213	8.7
	IV-9				550	40.7	279	556	-	125	-	-	1216	8.3
CfFA	Cf-1	50		42	500	31.5	266	531	-	-	314	-	1064	10.6
	Cf-2				525	32.5	272	544	-	-	293	-	1061	9.6
	Cf-3				550	33.8	279	556	-	-	266	-	1064	9.5
	Cf-4			45	500	34.2	266	531	-	-	247	-	1139	9.7
	Cf-5				525	35.4	272	544	-	-	227	-	1139	8.9
	Cf-6				550	36.9	279	556	-	-	199	-	1139	8.8
	Cf-7			48	500	37.5	266	531	-	-	179	-	1216	9.4
	Cf-8				525	38.8	272	544	-	-	158	-	1213	8.8
	Cf-9				550	40.4	279	556	-	-	131	-	1216	8.4
LSP	LP-1		50	42	500	29.4	266	531	-	-	-	373	1064	10.8
	LP-2				525	30.6	272	544	-	-	-	343	1067	10.2
	LP-3				550	32.0	279	556	-	-	-	316	1064	9.8
	LP-4			45	500	32.2	266	531	-	-	-	294	1139	9.7
	LP-5				525	33.6	272	544	-	-	-	264	1141	9.5
	LP-6				550	35.0	279	556	-	-	-	237	1139	8.9
	LP-7			48	500	35.7	266	531	-	-	-	212	1216	9.1
	LP-8				525	37.3	272	544	-	-	-	185	1218	8.9
	LP-9				550	39.2	279	556	-	-	-	155	1216	8.9

*1 モルタル中の細骨材容積比 *2 粗骨材かさ容積

(2) 粘度試験

高流動モルタルの塑性粘度は、B 型粘度計を用いて、各せん断速度 (rpm) における絶対粘度 (mPa・s) を測定した。さらに、せん断応力を式 (1) によって算出した。

$$\tau = \frac{1}{15000} \cdot \mu \cdot n \quad (1)$$

ここに、 τ ：せん断応力 ($\text{N/m}^2=\text{Pa}$)

μ ：絶対粘度 ($\text{mPa}\cdot\text{s}=10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)

n ：せん断速度 ($\text{rpm}=1/60\text{s}$)

B型回転粘度計での測定状況を写真4.1に、測定手順を以下に示す。まず、測定するモルタルをサンプラーカップに1L入れる。次に、使用するロータを取付け、浸液マークの箇所までモルタルが浸漬するようにスタンドの昇降ハンドルを回して、粒度計本体を上下に位置調整する。その際、ロータはサンプラーカップの中央に位置するよう調整する。電源を入れた後、ウォーミングアップ時間として10分以上放置する。粘度計本体に取り付けたロータのロータコードおよびロータの回転速度の設定を行う。回転速度は2rpm, 4rpm, 10rpm, 20rpm, 測定時間はそれぞれ30秒, 15秒, 10秒, 10秒とした。粘度試験結果より、絶対粘度の実験値から式(1)を使ってせん断応力を求め、せん断ひずみ速度 ($1/\text{s}$) と得られたせん断応力 (N/m^2) の関係を示した直線近似式の傾きを求めることにより、塑性粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) を決定した。図4.1に、B型回転粘度計で得られた絶対粘度、せん断応力、せん断ひずみ速度の関係について一例を示す。



写真4.1 B型粘度計の外観および計測状況

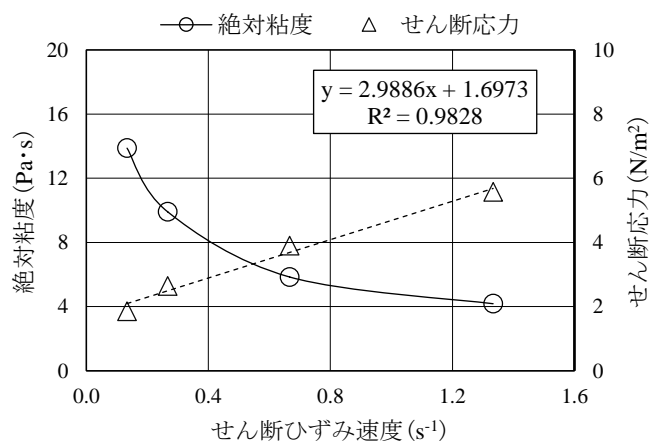


図4.1 絶対粘度、せん断応力、せん断ひずみ速度の計算結果一例
(FA II種, $G_m=500\text{L/m}^3$, $s/m=42\%$)

4.3 実験結果および考察

4.3.1 配合要因別評価

本実験で得られた結果一覧を表 4.4 に、シリーズ別のゼロ打モルタルフローの平均値と標準偏差を表 4.5 に示す。また、配合要因別のせん断ひずみ速度とせん断応力の関係を図 4.2(a)～(i) に、混和材シリーズ別の塑性粘度、降伏値、ゼロ打モルタルフローと粗骨材かさ容積の関係を図 4.3(a)～(d) に示す。目標ゼロ打モルタルフローは $270 \pm 15\text{mm}$ であり、全て目標の範囲内に納まっているため、降伏値がほぼ同程度の高流動モルタルを製造できたと判断できる。なお、LSP シリーズは FA 系 3 シリーズより平均値が 5mm 程度大きくなった。単位粗骨材かさ容積を一定とした場合、細骨材容積比の増加に伴いせん断応力は減少傾向を示した。これは、混和材量が減少し、細骨材量が増加することによる粘性の低下に起因する。一方で、細骨材容積を一定とすると、単位粗骨材かさ容積の増加に伴いせん断応力は減少した。細骨材量はほぼ一定となるが、混和材量が減少するため、粘性の低下に影響を与えたと考えられる。

表 4.4 実験結果一覧

シリーズ名	配合記号	W/C (%)	s/m (%)	Gm (L/m ³)	W/P (%)	P (kg/m ³)	SP使用量 (kg/m ³)	モルタルフロー			降伏値 (N/m ²)	塑性粘度 (Pa·s)
								mm	× mm	mm		
FA II 種	II-1	50	42	500	31.4	846	10.2	270	× 265	267.5	1.70	2.99
	II-2			525	32.5	838	10.1	271	× 266	268.5	1.44	2.50
	II-3			550	33.8	823	9.9	267	× 267	267.0	1.71	2.65
	II-4		45	500	34.1	779	9.7	264	× 263	263.5	1.61	2.42
	II-5			525	35.4	767	9.2	273	× 271	272.0	1.48	1.95
	II-6			550	36.8	756	9.1	274	× 265	269.5	1.37	2.16
	II-7		48	500	37.4	710	9.2	267	× 266	266.5	1.23	1.86
	II-8			525	38.8	703	8.8	263	× 263	263.0	1.47	2.03
	II-9			550	40.4	687	8.4	265	× 264	264.5	1.11	1.75
FAIV 種	IV-1	50	42	500	31.9	832	10.0	269	× 267	268.0	1.63	2.59
	IV-2			525	33.0	821	9.4	272	× 268	270.0	1.30	2.02
	IV-3			550	34.3	811	9.1	273	× 270	271.5	1.59	1.87
	IV-4		45	500	34.5	769	9.4	257	× 256	256.5	1.77	2.24
	IV-5			525	35.8	762	9.0	268	× 268	268.0	1.41	1.98
	IV-6			550	37.1	747	8.6	258	× 257	257.5	1.53	1.73
	IV-7		48	500	37.8	703	9.1	269	× 266	267.5	1.39	1.80
	IV-8			525	39.1	696	8.7	273	× 270	271.5	1.08	1.54
	IV-9			550	40.7	681	8.3	258	× 258	258.0	1.61	1.47
CfFA	Cf-1	50	42	500	31.5	845	10.6	275	× 275	275.0	1.95	3.42
	Cf-2			525	32.5	837	9.6	275	× 274	274.5	1.95	3.31
	Cf-3			550	33.8	822	9.5	272	× 271	271.5	1.22	2.47
	Cf-4		45	500	34.2	778	9.7	272	× 267	269.5	1.74	2.76
	Cf-5			525	35.4	771	8.9	262	× 259	260.5	1.62	2.06
	Cf-6			550	36.9	755	8.8	268	× 263	265.5	1.87	2.34
	Cf-7		48	500	37.5	710	9.4	262	× 260	261.0	2.39	2.82
	Cf-8			525	38.8	702	8.8	266	× 265	265.5	1.53	2.09
	Cf-9			550	40.4	687	8.4	272	× 260	266.0	1.75	1.89
LSP	LP-1	50	42	500	29.4	904	10.8	276	× 275	275.5	3.10	3.78
	LP-2			525	30.6	887	10.2	277	× 276	276.5	2.55	3.96
	LP-3			550	32.0	872	9.8	279	× 276	277.5	2.11	4.22
	LP-4		45	500	32.2	825	9.7	271	× 270	270.5	2.56	3.79
	LP-5			525	33.6	808	9.5	264	× 263	263.5	2.02	3.84
	LP-6			550	35.0	793	8.9	276	× 275	275.5	1.69	3.46
	LP-7		48	500	35.7	743	9.1	270	× 265	267.5	2.57	3.37
	LP-8			525	37.3	729	8.9	281	× 279	280.0	1.53	2.75
	LP-9			550	39.2	711	8.9	265	× 261	263.0	1.27	2.65

表 4.5 シリーズ別のゼロ打モルタルフローの変動

シリーズ	平均値 (mm)	標準偏差
FA II種	266.9	2.9
FAIV種	265.4	6.2
CfFA	267.7	5.3
LSP	272.2	6.3
全 36 配合	268.0	5.7

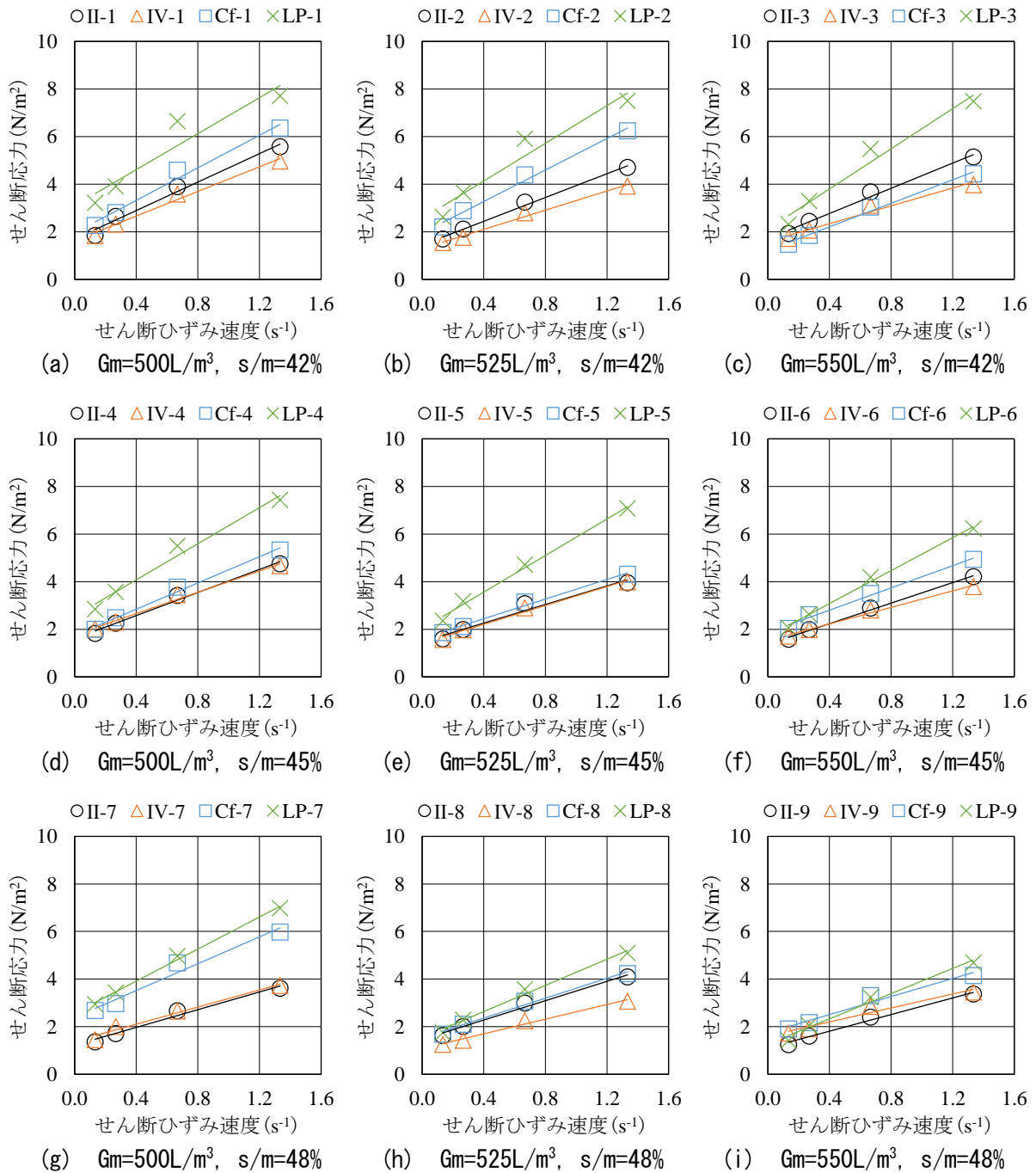


図 4.2 せん断ひずみ速度とせん断応力の関係

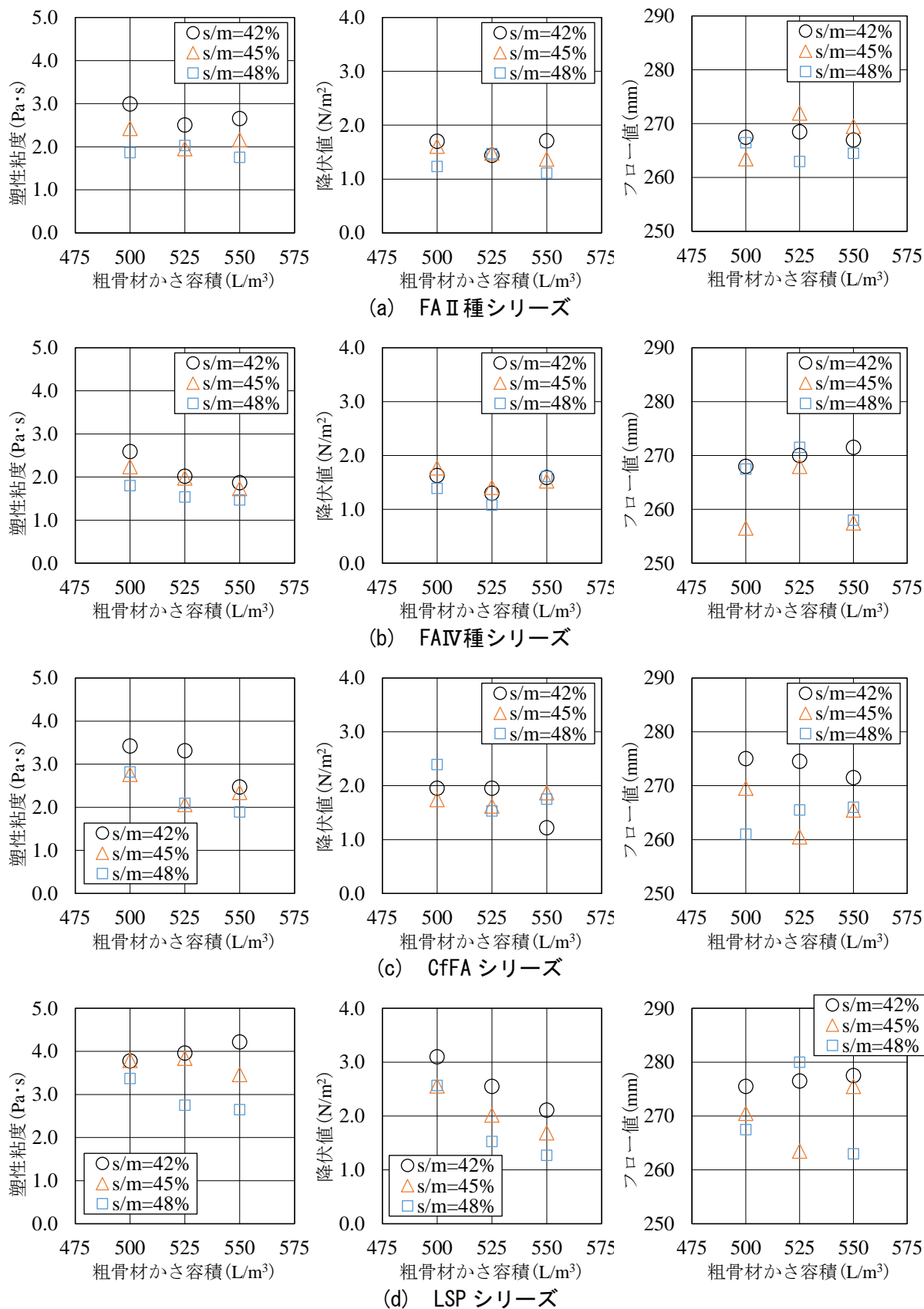


図 4.3 塑性粘度，降伏値，ゼロ打モルタルフローと粗骨材かさ容積の関係

4.3.2 各指標相互評価

(1) SP 剤使用量

単位混和材容積量と SP 剤使用量の関係を図 4.4 に示す。混和材種類の違いに関わらず、単位混和材容積量が増加するに伴い SP 剤使用量は直線的に増加しており、両指標間には高い相関性が認められた。高流動コンクリートの材料分離抵抗性を確保するためには単位混和材量を増やす必要があるが、材料分離抵抗性と流動性の相反する性状を確保するためには、SP 剤使用量は相当に増えることを意味する。単位混和材容積量と SP 剤添加率の関係を図 4.5 に示す。なお、SP 剤添加率は、セメントと混和材を足した総粉体量に対する SP 剤使用量の割合である。単位混和材容積量の増加に伴い SP 剤添加率は若干減少傾向を示した。

(2) ゼロ打モルタルフローと塑性粘度

ゼロ打モルタルフローと塑性粘度の関係を図 4.6 に示す。同一降伏値に対して、塑性粘度は $1.0\sim 4.0\text{Pa}\cdot\text{s}$ まで大きく変化することが明らかになった。普通コンクリートでは降伏値と塑性粘度に相関性があるが、高流動コンクリートでは同程度の降伏値であっても塑性粘度が大きく異なる。この傾向が、配合選定が難しい原因の一つであると考えられる。シリーズ別では、FAIV種の塑性粘度が最も小さく、FAII種と CfFA は同程度、LSP が最も大きくなった。これは、各混和材の比表面積に依存しており、比表面積の小さい混和材の方が塑性粘度は小さくなる傾向にあるといえる。各シリーズにおける最小の塑性粘度を基準に、各配合の塑性粘度の比率を塑性粘度比として、ゼロ打モルタルフローとの関係を図 4.7 に示す。塑性粘度比は、比表面積の大きい LSP が小さくなり、比表面積の大きい FAIV種が大きい結果となった。

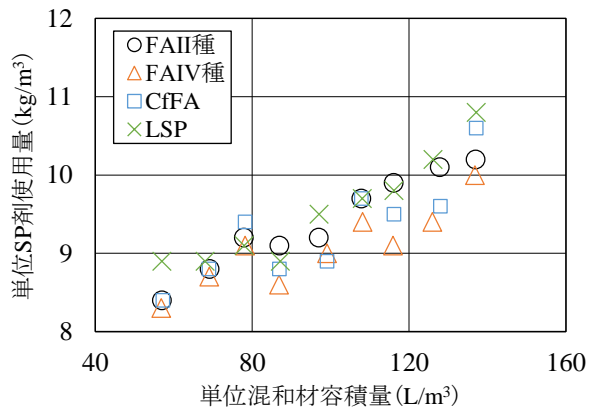


図 4.4 単位混和材容積量と SP 剤使用量

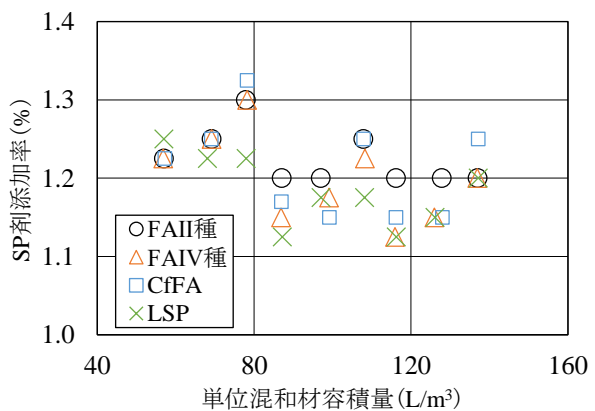


図 4.5 単位混和材容積量と SP 剤添加率

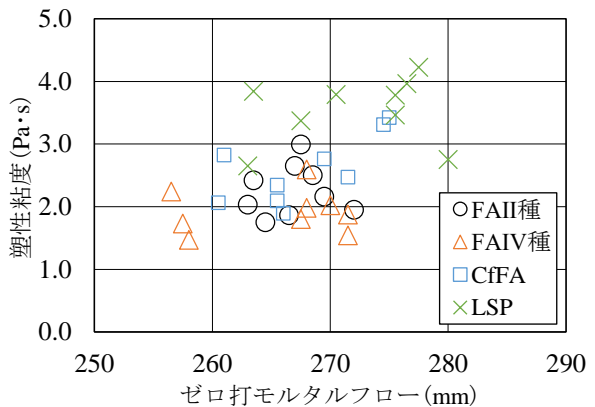


図 4.6 ゼロ打モルタルフローと塑性粘度

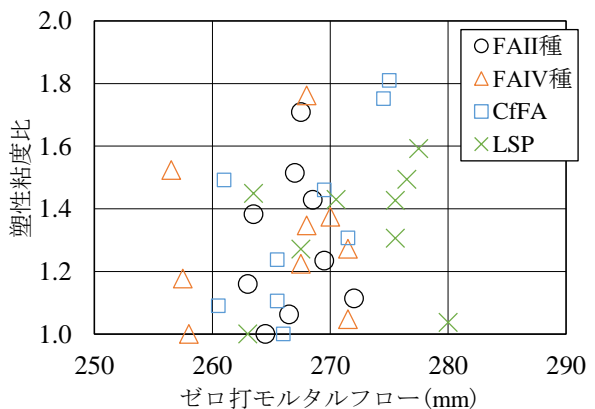


図 4.7 ゼロ打モルタルフローと塑性粘度比

比表面積の大きい混和材の方が塑性粘度の変化が小さいことを意味する。なお、本実験の範囲において、塑性粘度の平均は 1.4 前後であった。

(3) ゼロ打モルタルフローと SP 剤使用量

ゼロ打モルタルフローと SP 剤使用量, SP 剤添加率の関係を図 4.8, 図 4.9 に示す。ゼロ打モルタルフローと SP 剤使用量には正の相関性が認められる。シリーズ別では, FAIV種の SP 剤使用量が最も少なく, FA II種と CfFA は同程度, LSP が最も多くなった。これは, 各混和材の比表面積に依存しており, 比表面積の大きい混和材の方がゼロ打モルタルフローを一定とした場合, SP 剤使用量は増加する傾向にあるといえる。一方, SP 剤添加率では逆相関である。本実験では, ゼロ打モルタルフローを一定とするように SP 剤使用量を調整したため, この傾向の違いは無視できる範囲と判断した。シリーズ別では, FA II種の SP 剤添加率は 1.25% 前後ではほぼ一定であるのに対し, 他の混和材 (FAIV種, CfFA, LSP) の SP 剤添加率は 1.10 ~ 1.30% の範囲でばらつきが大きかった。

(4) 塑性粘度と SP 剤使用量

塑性粘度と SP 剤使用量, SP 剤添加率の関係を図 4.10, 図 4.11 に示す。塑性粘度と SP 剤使用量には正の相関性が認められる。シリーズ別では, 同一 SP 剤使用量に対する塑性粘度は, LSP, CfFA, FA II種, FAIV種の順に増大し, 混和材の比表面積に依存している。一方, SP 剤添加率では, LSP シリーズにおいて逆相関の傾向が顕著であった。塑性粘度比と SP 剤添加率との関係を図 4.12 に示す。塑性粘度比は, LSP が小さくなり, FAIV種や CfFA が大きくなった。また, LSP は, SP 剤添加率の増加に伴い塑性粘度比は小さくなり, 他の FA 系 3 種類 (FA II

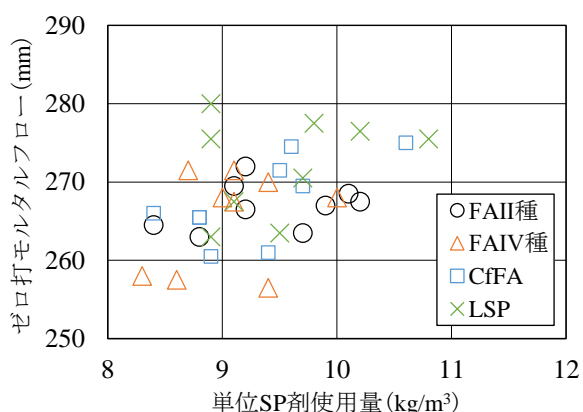


図 4.8 ゼロ打モルタルフローと SP 剤使用量

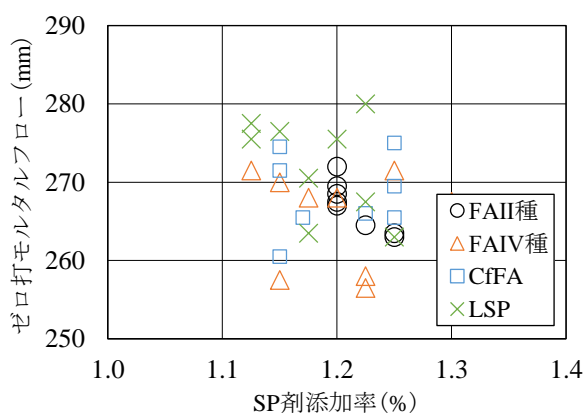


図 4.9 ゼロ打モルタルフローと SP 剤添加率

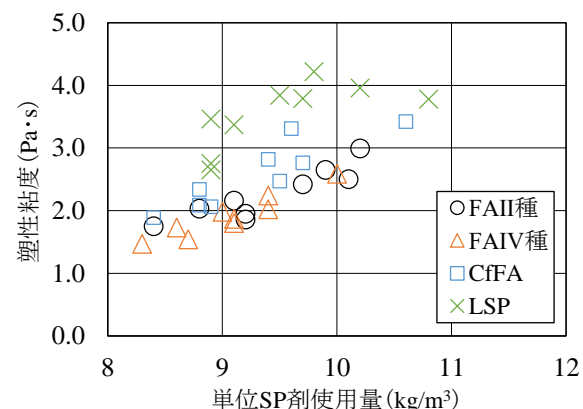


図 4.10 塑性粘度と SP 剤使用量

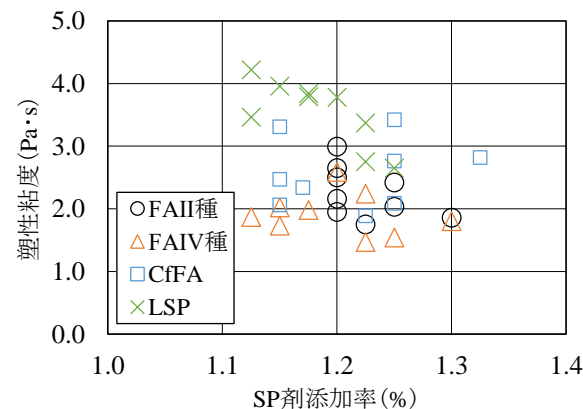


図 4.11 塑性粘度と SP 剤添加率

種, FAIV種, CfFA) とは逆の傾向が認められた。

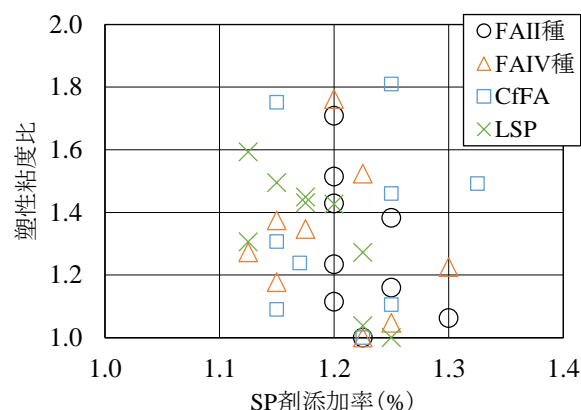


図 4.12 塑性粘度比と SP 剤添加率

4.4 粉体系高流動コンクリートの試し練りに対する手法の提案

本実験で得られた成果を基に、粉体系高流動コンクリートの試し練りに対する手法を以下に提案する。高流動コンクリートの試し練りを行う前に高流動モルタルの試し練りを行い、所要の降伏値と塑性粘度を満足するように単位混和材量と SP 剤使用量を決定する。その後、高流動コンクリートの試し練りを行うことを前提とする。

- ① まず、粉体系高流動コンクリートの自己充填性のランクを選択し、単位粗骨材絶対容積を決定する。なお、本研究では単位粗骨材かさ容積から配合決定したが、本手法では使用する粗骨材の実積率に単位粗骨材かさ容積を乗じた単位粗骨材絶対容積を用いることとする。高流動コンクリートの施工指針²⁾および本実験から得られた結果を基に、単位粗骨材絶対容積をランク 1 で $0.290\text{m}^3/\text{m}^3$ 、ランク 2 で $0.315\text{m}^3/\text{m}^3$ 、ランク 3 で $0.340\text{m}^3/\text{m}^3$ に設定する。
- ② 高流動モルタルのゼロ打モルタルフローは $270 \pm 15\text{mm}$ 、塑性粘度比は 1.4 ± 0.5 とする。
- ③ 設計基準強度から配合強度を求め、水セメント比を決定する。単位水量は $175\text{kg}/\text{m}^3$ を基本とし、水セメント比と単位水量から、単位セメント量を決定する。
- ④ 次に、粉体増量を目的とした混和材の種類 (FA II 種, FAIV 種, CfFA, LSP) を、材料入手の容易さや輸送コストを含めた経済性を考慮して選択する。
- ⑤ 単位混和材容積量を $50 \sim 150\text{L}/\text{m}^3$ から選択する。
- ⑥ 単位混和材容積量から総粉体量を求め、図 4.9 からゼロ打モルタルフロー 270mm に対する SP 剤添加率を求める。次に、SP 剤添加率に対する塑性粘度比を図 4.12 から求める。塑性粘度比が 1.4 以上になる場合は、単位混和材容積量を変更し、塑性粘度比を 1.4 程度になるまで繰り返し実施する。
- ⑦ 決定した高流動モルタルの配合から、単位粉体量と SP 剤使用量を高流動コンクリート 1m^3 に換算し、高流動コンクリートの配合を決定する。

第5章 結論

5.1 本研究の結論

5.1.1 電気炉酸化スラグ細骨材とフライアッシュを用いた粉体系高流動コンクリートに関する基礎的性状評価（第3章）

高い粘性により材料分離抵抗性に優れる粉体系高流動コンクリートについて、フライアッシュ混入量、水セメント比、単位水量などの違いが、電気炉酸化スラグ細骨材（風砕スラグ）を多量に使用した高流動コンクリートのフレッシュ性状、硬化性状および耐久性に及ぼす影響について評価を行い、電気炉酸化スラグ細骨材の適用の可能性について検討した。得られた成果は以下の通りである。

- (1) 電気炉酸化スラグ細骨材は所要のスランプフローを満足するための高性能 AE 減水剤使用量を大幅に低減でき、その効果は電気炉酸化スラグ細骨材置換率の増大に伴い著しい。
- (2) フライアッシュ混入量の増加に伴い AE 剤使用量は増加するが、電気炉酸化スラグ細骨材を置換することで大幅に低減できる。
- (3) 電気炉酸化スラグ細骨材は、材料分離抵抗性を損なうことなく粉体系高流動コンクリートの流動性、間隙通過性、自己充填性を改善する。
- (4) 電気炉酸化スラグ細骨材の多量使用はブリーディング量の増大を招くが、単位水量の低減やフライアッシュ混入量を増加することにより抑制可能であり、電気炉酸化スラグ細骨材置換率 100%の条件においても配合条件によりブリーディング量の規定値 $0.30\text{cm}^3/\text{cm}^2$ を下回った。
- (5) 電気炉酸化スラグ細骨材置換率の増大に伴い圧縮強度は低下したが、強度低下割合は 10%程度と比較的小さかった。また、フライアッシュ混入量の増加に伴い各材齢における圧縮強度は増加した。
- (6) 静弾性係数は、電気炉酸化スラグ細骨材を使用した条件で最も大きくなった。材齢で比較すると、材齢の進行に伴い圧縮強度は増加するが、静弾性係数は圧縮強度の増加に比例するほど増加しなかった。
- (7) 電気炉酸化スラグ細骨材を使用することで、乾燥収縮ひずみ、質量減少率ともに他の細骨材と比較して小さくなった。また、乾燥収縮ひずみと質量減少率には高い相関性があることが確認できた。
- (8) 細骨材種別の違いに関わらず相対動弾性係数は 60%以上を満足しており、電気炉酸化スラグ細骨材を多量に使用したコンクリートにおいても良好な凍結融解抵抗性を有している結果となった。

5.1.2 混和材の種類が粉体系高流動モルタルの塑性粘度に与える影響評価（第4章）

今後需要の増加が予想されるプレキャストコンクリート製品に着目し、粉体系高流動コンクリートの降伏値と塑性粘度が表面気泡性状および脱泡性に及ぼす影響を明らかにすることを最終目的として、その基礎的研究として粉体系高流動モルタルを対象とし、混和材の種類や単位量が粉体系高流動モルタルの塑性粘度に与える影響について、B型粘度計を用いて定量的に評価した。得られた成果は以下の通りである。

- (1) 塑性粘度は、 $1.0\sim 4.0\text{Pa}\cdot\text{s}$ の範囲で変化する。
- (2) 単位混和材容積とSP剤使用量は比例関係を示し、混和材種類の違いに関わらず一つの直線近似式で表現可能である。
- (3) ゼロ打モルタルフロー270mmに対するSP剤添加率はほぼ一定である。
- (4) 最小塑性粘度に対する塑性粘度比は、混和材の種類に依存し、大きく変化する。

5.2 今後の展望と課題

本研究では、電気炉酸化スラグ細骨材の特徴に着目した粉体系高流動コンクリート配合に関する新たな可能性および粉体系高流動モルタルの塑性粘度を定量的に評価し、高流動コンクリートの配合決定までにかかる労力軽減や簡易的な配合選定手法を見出した。以下に、本研究での結果を踏まえ、今後の展望と課題を述べる。

5.2.1 電気炉酸化スラグ細骨材

電気炉酸化スラグ細骨材については、粉体系高流動コンクリートの特徴でもある高い耐久性を有しつつ、高スラグ置換率の実現を示唆するものであり、環境負荷低減の観点からも有効であるといえる。また、従来の一般的な粉体系高流動コンクリートに比べ、流動性や間隙通過性、自己充填性に優れるため、更なる現場の省力化、省人化、合理化を図ることも可能である。一方、本研究では材料分離抵抗性確保のためフライアッシュを多量に使用しているが、フライアッシュ中に含まれる未燃炭素がAE剤を吸着することで空気連行性が低下し、コンクリートのフレッシュ性状や耐凍害性の低下が危惧された。本研究の範囲において顕著な影響は見られなかったが、連行した空気が経時に伴って減少しやすいことも既往の研究で指摘されており、実際の生コンクリートプラントでの製造や現場までの運搬を想定した場合、経時に伴う空気量の変動や流動性状の把握を行うことは重要であり、その性状を評価することで実用段階に近づくものと考えられる。次の検討段階として、まず室内試験レベルにおける電気炉酸化スラグ細骨材を多量に使用した粉体系高流動コンクリートの経時変化に及ぼす影響について評価・検討を行う必要があると考える。

また、本研究では締固めをしないことを前提とした自己充填性を有する高流動コンクリート（**第2章 図2.13参照**）を対象としたが、より合理的に施工を行う観点から、自己充填性は有しないが軽微な振動締固めにより密実に充填できる加振併用型の高流動コンクリート（以下、自己充填

性を有する高流動コンクリートと区別するために中流動コンクリートと称する)が実用化されている。特に、トンネル覆工の施工性と品質向上を目的とした中流動コンクリートの採用が注目されており、東・中・西日本高速道路(株)(以下、NEXCOと称する)では、中流動コンクリートを基準化したトンネル施工管理要領³²⁾を制定している。高流動コンクリートの配合設計手法は前述した指針²⁾に取り纏められている一方で、中流動コンクリートの配合設計手法に関する体系的な検討はほとんどなされておらず、現場の施工条件や使用する生コンクリート工場の材料の品質に応じて、その都度配合を選定している現状にある。中流動コンクリートの目標スランプは $21 \pm 2.5\text{cm}$ 、スランプフローは $35 \sim 50\text{cm}$ で、高流動コンクリートに比べ材料コストの低減を目的の一つにしていることから、セメント量(粉体量)を強度や耐久性の確保に必要な最小量としつつ、流動性を高める必要がある。NEXCOのトンネル施工管理要領では最小セメント量を 270kg/m^3 としており、一般的な実績は、セメントとフライアッシュや石灰石微粉末などの混和材を混入した総粉体量で $350 \sim 400\text{kg/m}^3$ 程度となるように配合設計されている事例が多い。本研究の範囲において、電気炉酸化スラグ細骨材を高流動コンクリートに適用した場合、各種性状に大きな問題が生じないことを確認したが、最小粉体量は 450kg/m^3 までしか検討しておらず、その配合についてもブリーディング量の増大が確認されている。電気炉酸化スラグ細骨材自体の特徴により、粉体量の多い高流動コンクリートでは流動性や間隙通過性、自己充填性の向上に有利に働くが、粉体量の比較的少ない中流動コンクリートでは骨材の沈降やブリーディング量の増加など、材料分離の発生が危惧される。中流動コンクリート配合に使用することを前提に、振動作用下における充填性や間隙通過後のコンクリートの均質性について評価を行い、粉体量の少ない中流動コンクリートにおける電気炉酸化スラグ細骨材の適用の可能性について検討することは、電気炉酸化スラグ細骨材の更なる用途拡大に繋がると考える。また、第4章で提案した粉体系高流動モルタルの塑性粘度を評価することによる高流動コンクリートの配合選定手法を応用し、振動作用下での中流動コンクリートの塑性粘度や降伏値について評価・検討することは、配合決定までにかかる労力軽減に繋がり、今後の指標の一つに成り得ると考える。今後の検討課題の一つとしたい。

5.2.2 高流動モルタルの塑性粘度

粉体系高流動モルタルの評価については、混和材種類、粗骨材かさ容積、細骨材容積比の異なるモルタルについて、任意のレオロジー定数(塑性粘度、降伏値)を得る手法を検討した。その結果、粗骨材かさ容積、細骨材容積比の変化がモルタルのレオロジー定数に及ぼす影響の程度および任意のレオロジー定数を得るための高性能減水剤添加率の選択方法が明らかになった。本研究の最終目的は、プレキャストコンクリート製品の品質および美観向上を図るため、コンクリート内部に巻き込んだ空気を自然脱泡する適正粘度の把握を行うことである。表面気泡の発生量は、フレッシュ時のモルタル相の流動性の影響を受けると考えられ、レオロジー定数で表される。高流動モルタルを用いた本実験の代表的な粉体(FAⅡ種)において、ゼロ打モルタルフロー一定とした場合の最大塑性粘度配合と最小塑性粘度配合の表面気泡の挙動や最大直径、発生量に差が観

察されるか確認する。その際、モルタル中に強制的に気泡を注入し、気泡の移動距離（脱泡性状）についても評価する。その後、それぞれの混和材について同様の実験を繰り返し、高流動モルタルのレオロジー定数が表面気泡に及ぼす影響を明確にし、最終的な高流動コンクリートの表面気泡低減を目的とした簡易的な配合選定手法について検討する。これは、実際の工場で行う配合決定までにかかる労力軽減や材料選定が容易となることから、高流動コンクリートの発展に寄与できるものとする。

参考文献

- 1) 土木学会：電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー110，2003.5
- 2) 土木学会：高流動コンクリートの配合設計・施工指針 [2012年版]，コンクリートライブラリー136，2012.6
- 3) 五味信治，梶田佳寛，青沼隆嗣，村上哲也：スラグ骨材を使用した高密度コンクリートの配合に関する実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.463-468，2007
- 4) 五味信治，梶田佳寛，青沼隆嗣，佐藤佳広：スラグ骨材を使用し施工可能な性能を持つ高密度コンクリートの調合条件に関する実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1517-1522，2010
- 5) 小野朝陽，庄谷征美，阿波稔：電気炉酸化スラグ細骨材を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究，土木学会第58回年次学術講演会，V-199，pp.397-398，2003
- 6) 佐久間雅孝，笠井哲郎，福島誠司：電気炉酸化スラグ骨材コンクリートの凝結遅延に関する研究，土木学会第58回年次学術講演会，V-499，pp.997-998，2003
- 7) 大羽慧，伊藤洋介，河辺伸二：電気炉酸化スラグモルタルの準マイクロ波帯における電波吸収特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.657-662，2016
- 8) 長瀧重義，大賀宏行，嶋田久俊：フライアッシュを混和したコンクリートの耐凍害性評価，セメントコンクリート論文集，No.41，pp.371-374，1987
- 9) 千歩修，劉宏渉：フライアッシュコンクリートの静置による気泡組織・耐凍害性の変化，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.963-964，2004.8
- 10) 山本隆信，杉山隆文，辻幸和：フライアッシュコンクリートの空気連行性およびブリーディングに影響を及ぼす各種要因，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.97-102，1998
- 11) 小川雄一郎，橋本学，林大介，坂田昇ほか：フライアッシュコンクリートの凝結過程における空気量の変化に関する検討，土木学会第66回年次学術講演会，V-510，pp.1019-1020，2011
- 12) 北辻政文，青山宏昭，小川誠一郎：FA コンクリートへのプレフォーム型 AE 剤の適用に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.207-212，2007
- 13) 李相培，佐藤嘉昭，岡田秀敏，清原千鶴：焼成工程を備えた風力微粉碎処理システムによる石炭灰の改質，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.183-188，2007
- 14) 三岩敬孝，水口裕之，橋本親典，石丸啓輔：高流動コンクリートの流動性に及ぼす強熱減量および粗粒率の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.967-972，2001
- 15) 川上晃，李昇憲，坂井悦郎，大門正機：未燃カーบอนを多量に含んだフライアッシュと高性能 AE 減水剤の作用，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.127-132，1999
- 16) 西川隆之，橋本親典，吉岡靖司，浦野真次：充てん試験装置の形状が高流動コンクリートの

- 自己充てん性能に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.475-480, 1999
- 17) 近松竜一, 三浦律彦, 十河茂幸: 高流動コンクリートの間げき通過性試験方法に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.523-528, 1999
 - 18) 吉野公, 西林新蔵, 井上正一, 黒田保: 高流動コンクリートのレオロジー一定数に及ぼす配合要因の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.343-348, 1998
 - 19) 五味信治, 米奥久貴, 梶田佳寛: 高流動コンクリートからウェットスクリーニングしたモルタルに関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1251-1256, 2004
 - 20) 三田勝也, 中島裕幸, 菅原佑夏, 辻正哲, 児玉総一郎: コンクリートの表面気泡の発生機構に関する実験的研究, 土木学会第 64 回年次学術講演会, V-451, pp.899-900, 2009.9
 - 21) 一宮一夫, 出光隆, 山崎竹博: 粉体系高流動コンクリートの表面気泡に及ぼす型枠の濡れと傾斜角度の影響, 土木学会論文集, No.704/V-55, pp.143-150, 2002.5
 - 22) 黒田泰弘, 辻埜真人, 依田侑也, 湯浅竜貴, 根本浩史: 打放しコンクリートの美観向上に関する研究, 清水建設研究報告, Vol.93, pp.47-56, 2016.1
 - 23) 山田悠二, 渡邊健, 橋本親典, 井上裕史: 表面気泡抜き取り装置による表面気泡除去過程の可視化と実構造物における中性化抑制効果に関する調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1243-1248, 2015
 - 24) Sushanta Roy, Taito Miura, Hikaru Nakamura, Yoshihito Yamamoto : High temperature influence on concrete produced by spherical shaped EAF slag fine aggregate – Physical and mechanical properties, Construction and Building Materials, Vol.231, 20 January 2020, 117153
 - 25) 井上裕貴, 橋本親典, 渡辺健, 石丸啓輔: 骨材の吸水率がコンクリートの乾燥収縮特性に与える影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.473-478, 2011
 - 26) 橋本紳一郎, 橋本親典, 渡辺健, 上田隆雄: 液体窒素を用いた急速凍結融解試験によるコンクリート表面劣化の定量化, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.887-892, 2006
 - 27) 弓場上有紗, 橋本親典, 渡辺健, 石丸啓輔: 再生骨材コンクリートによる JIS の凍結融解試験方法(A 法)と液体窒素を用いた簡易急速凍結融解試験方法の比較, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.941-946, 2011
 - 28) 高山俊一: 高流動コンクリートの流動性と骨材の実積率, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, 2001
 - 29) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2015.7
 - 30) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], pp.43, 2017.3
 - 31) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造構造物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.2
 - 32) 東・中・西日本高速道路株式会社: トンネル施工管理要領, 2017.7