

東海大学大学院 平成 30 年度 博士論文

戻りコンクリートから製造した乾燥スラ  
ッジ微粉末の諸特性とその有効利用に  
関する研究

大川 憲

# 目 次

第1章 序論 .....	1
1.1 研究の背景 .....	1
1.2 研究の目的 .....	2
1.3 本論文の構成 .....	3
参考文献 .....	4
第2章 戻りコンクリートの現状と既往の研究.....	5
2.1 はじめに .....	5
2.2 国内における戻りコンクリートの現状.....	5
2.2.1 概要 .....	5
2.2.2 国土交通省による残コン・戻りコンに関するアンケート調査結果の概要.....	5
2.3 海外における戻りコンクリートの現状.....	8
2.3.1 北米 .....	8
2.3.2 欧州 .....	9
2.3.3 韓国 .....	10
2.3.4 中国 .....	10
2.4 戻りコンクリートに関連する JIS 規定の現状.....	11
2.4.1 スラッジ水.....	11
2.4.2 トラックアジテータのドラム内に付着したモルタル.....	11
2.4.3 回収骨材 .....	12
2.5 戻りコンクリートの有効利用に関する既往の研究.....	12
2.5.1 戻りコンクリートから回収したスラッジ水.....	12
2.5.2 戻りコンクリートから製造した乾燥スラッジ微粉末.....	12
2.5.3 戻りコンクリートのその他の有効利用に関する研究.....	13
2.6 環境負荷低減型コンクリートに関する既往の研究.....	13
2.6.1 ジオポリマーコンクリート.....	13
2.6.2 環境負荷低減型コンクリート.....	13
2.7 まとめ .....	14
参考文献 .....	15

第3章 DSPの基礎物性および品質管理手法に関する研究	17
3.1 はじめに	17
3.2 DSPの製造方法	17
3.3 DSPの基礎物性	18
3.3.1 DSPの密度、強熱減量、比表面積試験	18
3.3.2 DSPの粒度分布	19
3.3.3 DSPのSEM画像	19
3.3.4 DSPの未水和セメント量	20
3.3.5 DSPに含まれる微砂分含有量試験	21
3.3.6 DSPの化学成分および鉱物組成	22
3.3.7 DSPの六価クロム溶出量	22
3.4 DSPの品質向上手法に関する研究	23
3.4.1 遅延剤による品質向上手法	23
3.4.2 DSPの分級・粉砕による品質向上手法	25
3.5 DSPの品質管理手法に関する研究	32
3.5.1 実機プラントによるDSP製造実験概要	32
3.5.2 実験方法	33
3.5.3 実験結果および考察	34
3.6 まとめ	36
参考文献	36
第4章 DSPを用いたクリンカーフリーコンクリート	38
4.1 はじめに	38
4.2 DSPを用いたクリンカーフリーコンクリートの基礎物性	38
4.2.1 DSPと高炉スラグ微粉末	38
4.2.2 DSPとフライアッシュ	43
4.2.3 DSP, 高炉スラグ微粉末およびフライアッシュ	45
4.2.4 中性化予測	49
4.2.5 RCCFコンクリート	50
4.3 DSPを用いたクリンカーフリーコンクリートの耐久性	52
4.3.1 中性化抵抗性に関する実験概要	52
4.3.2 収縮ひび割れ抵抗性に関する実験概要	53
4.3.3 使用材料および配合	54
4.3.4 実験方法	54
4.3.5 実験結果および考察	56
4.4 まとめ	66
参考文献	67

第5章 DSPの各種コンクリートへの有効利用	68
5.1 はじめに	68
5.2 DSPを用いたレディーミクストコンクリート（生コン）	68
5.2.1 実験概要	68
5.2.2 実験結果および考察	70
5.2.3 現場実打設	72
5.2.4 実験結果および考察	73
5.3 DSPを用いたプレキャストコンクリート	75
5.3.1 積みブロックコンクリートの製造方法	75
5.3.2 実験概要	75
5.3.3 実験結果および考察	77
5.4 まとめ	80
参考文献	81
第6章 結論	82
6.1 本論文のまとめ	82
6.2 本研究に関する今後の課題	85
謝辞	87

# 第 1 章

---

## 序論

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

社会資本整備の重要な材料として、コンクリートは欠かせないものである。国内では1949年からレディーミクストコンクリート工場（以下、レミコン工場と称す）の操業が開始され、現在は国内に3351工場（2017年6月現在）となった<sup>1)</sup>。国内のレディーミクストコンクリート（以下、生コンと称す）の出荷量は1990年度の1億9,800万m<sup>3</sup>/年をピークに、2016年度は8,400万m<sup>3</sup>/年（図1.1参照）程度とほぼ半減しているが<sup>1)</sup>、生コンはコンクリートの総使用量の80%超を占めている。この生コンを用いてコンクリート構造物の施工を行う場合、必要とされるコンクリート量に対し運搬・納入されるコンクリート量は工事の特性上、施工者が余裕を持って発注するため、コンクリート施工のたびに余剰な生コンが発生する<sup>2)</sup>。一般に、この残余の生コンはレミコン工場に戻され（戻りコンクリート、以下戻りコンと称す）、生コンプラントおよびアジテータ車の洗浄時に発生する生コンと共に最終処分または有効利用のための処理が行われている。この処分または処理にかかるコストはレミコン工場側の負担となっており、経営上の大きな課題となっている。環境負荷低減の観点からも、戻りコンの削減または有効利用を推進することは社会的ニーズの高い事項である。このような背景から、国土交通省はその実態調査に乗り出し、残コ

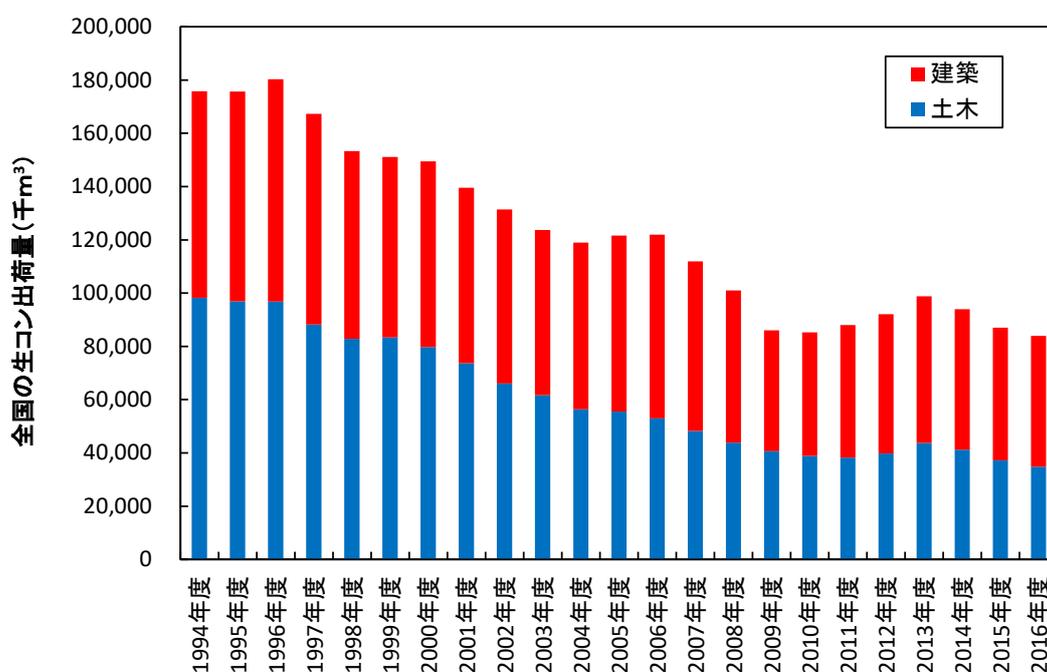


図 1.1 全国の生コンクリート出荷量（年度別）

ン・戻りコンの発生抑制，有効利用に関するアンケート調査の結果概要を公表した<sup>3)</sup>。この報告の詳細な内容については第2章に記述するが，残コン・戻りコンの量は平成17年時点で出荷されたコンクリートの約1.6%と報告され，年間100万m<sup>3</sup>超が廃棄されている<sup>3)</sup>。さらに平成27年の日本コンクリート工学会のアンケート調査結果によると，都市部ではその比率は2~4%程度であると報告されている<sup>4)</sup>。また，近年，産業廃棄物処分場の建設が一層厳しくなる中，残余容量が減少傾向にあることから，生コン業界においても廃棄物削減とリサイクル促進は喫緊の課題であり，今後廃棄処分費の高騰が予想される。一例として本リサイクル事業を行っているレミコン工場において戻りコンをリサイクルした場合としない場合のコスト比較を行ったところ，リサイクルした場合，戻りコン700m<sup>3</sup>/月に対し若干のコストメリットが得られ，それを各種コンクリートで有効利用することで，CO<sub>2</sub>排出量を大幅に削減できる技術として期待されている。

一方，近年，環境指向の高まりから建設産業における地球温暖化の抑制対策として，CO<sub>2</sub>排出量の削減が求められ，コンクリート分野においても同様の観点からクリンカー起源の普通ポルトランドセメント（以下，OPCと称す）を用いないコンクリート（以下，クリンカーフリーコンクリートと称す）の開発が行われている。さらに海外においては，2007年にRILEM(Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures, 国際材料構造試験研究機関・専門家連合)においてジオポリマーを含むアルカリ活性材料に関する学術研究委員会（Technical Committee 224-AAM）が設けられ，ジオポリマーの基礎から応用にかけての研究が遂行されている。国内でもこのジオポリマーと高炉スラグ微粉末（以下，BFSと称す）やフライアッシュ（以下，FAと称す）を用いたコンクリートの開発を行っている。これらのコンクリートは，高強度の硬化体を得られるが，水酸化カルシウム量が少なく中性化抵抗性を付与することが難しいため，鉄筋コンクリート（RC）造構造物に適用するには中性化抵抗性の確保が大きな課題となっている<sup>5)</sup>。

上記のジオポリマー以外では，副産物の有効利用を含めた環境負荷低減型コンクリートの開発が多数報告されている<sup>6),7)</sup>。これらは，OPCよりもCO<sub>2</sub>排出量が少ないBFSやFAなどの混和材を高置換させたものである。これらのコンクリートも上記と同様な問題を抱えている。

戻りコンクリートの有効利用および上記の環境負荷低減型コンクリートの既往の研究についての詳細は，第2章に記述することとした。

## 1.2 研究の目的

本研究では，戻りコンの処理に伴う処分場の逼迫や地球温暖化への課題を同時に解決することを指向し，レミコン工場で発生する戻りコンから骨材を回収し，残余のスラッジ水を脱水後，破碎乾燥処理した乾燥スラッジ微粉末（以下，DSPと称す）に関

し、その基礎物性および DSP の品質管理手法を確立することを指向し、夏季の DSP の品質低下が想定され、その品質向上を目的に遅延剤添加の効果および DSP の品質に及ぼす分級や粉砕の影響について検討した。さらに実機プラントを用いた DSP の製造実験を行い、品質管理手法を提案する。

また DSP の各種コンクリートへの有効利用に関しては、OPC をほとんど用いず、DSP と副産物混和材を主な結合材としたクリンカーフリーコンクリート（以下、RCCF コンクリートと称す）のプレキャスト製品への適用について検討した。このコンクリートは製造過程における CO<sub>2</sub>排出量を約 90%削減する究極の低環境負荷コンクリートであることからその普及が期待される。さらに OPC に DSP を 20~30%置換し汎用性を重視した低環境負荷コンクリートを生コンや無筋プレキャストコンクリート製品積みブロックへの適用についても検討した。なお、これらのコンクリートは CO<sub>2</sub>排出量を約 20%削減できる。

### 1.3 本論文の構成

第 1 章では、本研究の背景、研究の目的および本論文の構成を示した。

第 2 章では、戻りコンの国内および海外の状況および戻りコンに関連する JIS 規定の現状について整理した。また戻りコンの有効利用および環境負荷低減型コンクリートに関する既往の研究についても調査した。

第 3 章では、DSP の品質は処理方法が大きく影響することが想定されるため、その品質管理手法を確立することを目的とし、DSP の基礎物性および実機プラントを用いた DSP の製造実験を実施した。さらに夏季における DSP の品質向上を目的に遅延剤添加の効果および DSP の品質に及ぼす分級や粉砕の影響について検討した。

第 4 章では、DSP を用いたクリンカーフリーコンクリートについて検討した。このコンクリートは OPC をほとんど用いず、DSP と副産物混和材を結合材としたコンクリートである。本章では RCCF コンクリートの基礎物性や耐久性に着目し、中性化抵抗性およびひび割れ抵抗性について検討した。

第 5 章では DSP の各種コンクリートへの有効利用について検討した。まず DSP を用いた生コンへの適用について検討した。これは、DSP を OPC に 20~30%置換したコンクリートである。次にプレキャストコンクリート製品への適用について実施した。これは上記の生コンと同様な結合材の割合で行った。

第 6 章は結論であり、各章で得られた知見をまとめた。さらに、本研究に関する今後の課題についても述べた。

## 参考文献

- 1) 全国生コンクリート工業組合連合会 HP : <http://www.zennama.or.jp/>
- 2) 日本コンクリート工学会：残コン・戻りコンの発生抑制及び有効利用に関する技術検討委員会報告書，2012.1
- 3) 国土交通省総合政策局建設振興課労働資材対策局：残コン・戻りコンの発生抑制，有効利用に関するアンケート調査の結果概要について，国土交通省，2006
- 4) 日本コンクリート工学会：第 22 回生コンセミナー「これまでの 50 年、これからの 50 年」，pp.57，2015.7
- 5) 日本コンクリート工学会：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017.9
- 6) 小林利充，神代泰道，吉田理紗，溝渕麻子:混和材を高含有したコンクリートの場所打ち杭への適用に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1465-1470，2017.7
- 7) 辻大二郎，小島正朗，井上和政，野口貴文：高炉スラグ微粉末を高含有した結合材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の向上に関する実験検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.201-206，2016.7

## 第2章

---

### 戻りコンクリートの現状と既往の研究

## 第2章 戻りコンクリートの現状と既往の研究

### 2.1 はじめに

本章では、戻りコンの国内および海外の状況について整理した。また戻りコンに関連する JIS 規定の現状についても整理した。さらに、戻りコンの有効利用や環境負荷低減型コンクリートに関する既往の研究について調査した。

### 2.2 国内における戻りコンクリートの現状

#### 2.2.1 概要

国内では、1975年に現日本コンクリート工学会において回収水研究委員会(委員長：國分正胤氏)を設置し、戻りコン等から回収したスラッジ水のスラッジ固形分率が3%以下であれば配合の補正で上水道水を用いたコンクリートと同等の品質のコンクリートが製造できることが報告された。その後、1978年に JIS A 5308(改正)でスラッジ固形分率3%以下での使用が規定され、さらに2011年に JIS A 5308(追補)において、スラッジ固形分率を1%未満で使用できるように従来よりも利用を促進する規定が盛り込まれた。一方、2014年の JIS A 5308の改正では戻りコンから回収された骨材(以下、回収骨材と称す)の使用についても規格化された。しかし、スラッジ水は生コン工場での使用が年々減少していることが報告されており<sup>1)</sup>、これまでにスラッジ水を用いたコンクリートの研究も多数報告されているが<sup>2)</sup>、未だに品質低下に関する不安が影響しているため、普及が進んでいない。一方、回収骨材は建築基準法37条の建築材料から除外されており、特に都市部では建築工事の割合が高いため、普及に大きく影響しているようである。さらに戻りコンの処理過程に加え、生コンプラントおよびアジテータ車の洗浄時にも発生する生コンスラッジに関しては、その有効利用についての研究は多数報告されているにも拘らず<sup>3)</sup>、再生利用は進まず現状ではほとんどが廃棄処理され、大きな課題となっている。

#### 2.2.2 国土交通省による残コン・戻りコンに関するアンケート調査結果の概要

この調査は、国土交通省総合政策局建設振興課労働資材対策室により行われ、平成17年に行われた<sup>4)</sup>。調査対象は、建設会社は400社の内、有効回収数は254件であった。生コン業者は400社の内、有効回収数は295件であった。

アンケート調査結果の一部を図2.1~2.5に示す。残コン・戻りコンの発生要因を図2.1に示す。図より、建設会社、生コン会社とも「購入側が余裕をみて発注」との回答が9割以上を占めた。次に、残コン・戻りコンの発生率の変化について、生コン会社から回答を得たものを図2.2に示す。図より、「全体としては、あまり変化していない」が59%と最も

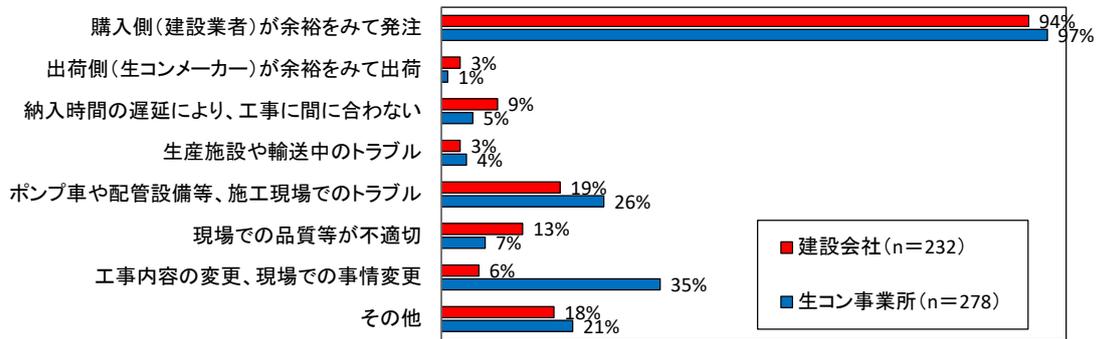


図 2.1 残コン・戻りコンの発生要因（複数回答）

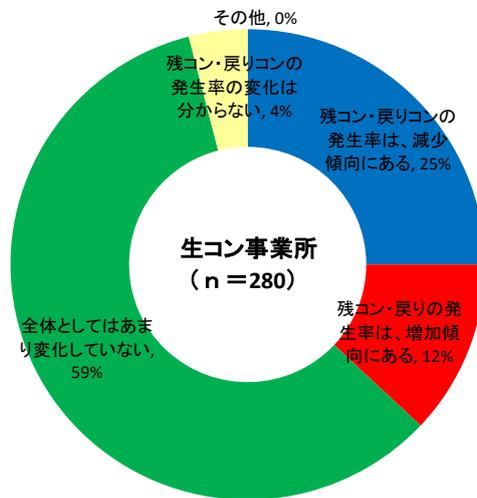


図 2.2 残コン・戻りコンの発生率の変化（生コン事業所）

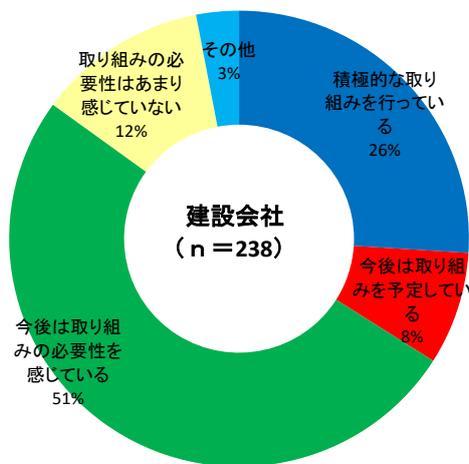


図 2.3 発生抑制への取り組み状況（建設会社）

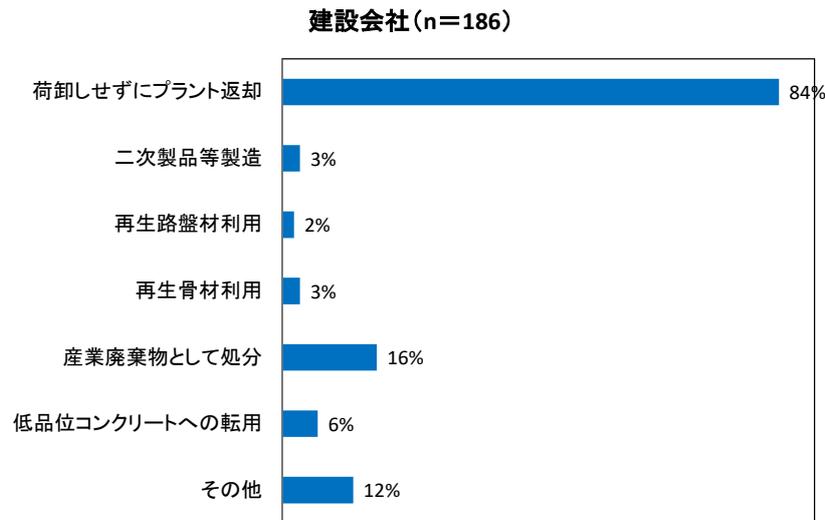


図 2.4 残コン・戻りコンの処理方法（建設会社 複数回答）

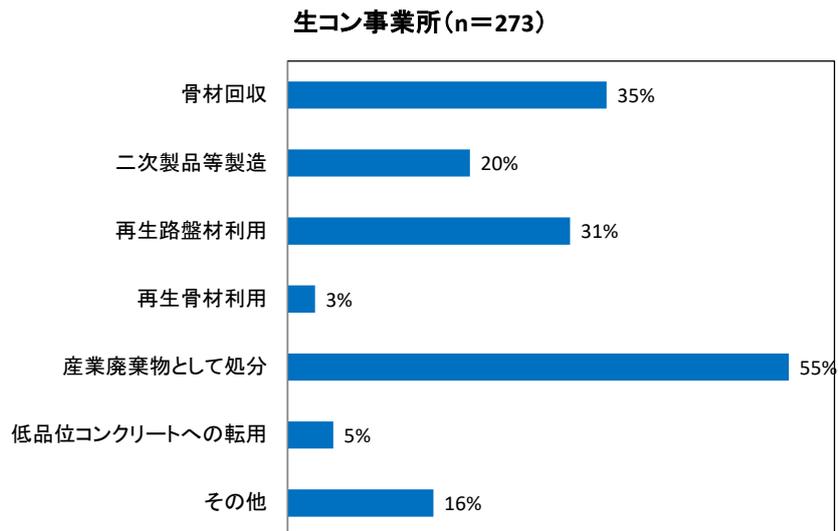


図 2.5 残コン・戻りコンの処理方法（生コン事業所 複数回答）

多かった。「発生抑制への取り組み状況」について、建設会社から回答を得たものを図 2.3 に示す。図より「今後は取り組みの必要性を感じている」が 51%で最も多かった。最後に「残コン・戻りコンの処理方法（複数回答）」について、建設会社および生コン事業所から回答を得たものを図 2.4、図 2.5 に示す。建設会社では「荷卸しせずにプラント返却」が最も多く、生コン会社では「産業廃棄物として処分」が最も多かった。

以上、これらは調査の一部であるが、これらの回答からも国内の戻りコンの状況が推測できる。

## 2.3 海外における戻りコンクリートの現状

### 2.3.1 北米

米国では1987年より、資源の有効活用を目的に、生コン工場のコンクリート廃棄物を最小限にとどめる技術が実用化されている。具体的には、生コン車のドラム内の付着コンクリートを廃棄しないで化学処理剤を使用して有効利用する方法と、戻りコンを有効活用する方法が世界で初めて導入されたと報告されている。

この技術を利用した一例として、カルフォルニア州の生コン工場で導入された。導入以前は、コンクリートの廃棄費用として年約6万ドルの他、洗浄設備のメンテナンスにも多大な費用をかけていたが、化学処理剤を導入したことにより年間4~5万ドルのコスト削減が可能であり35台保有している生コン車の洗浄排水も大幅に減少できたと報告されている。

また、Master Builders社は、米国陸軍工兵隊とともに本技術に関する検討を継続して行っており、1995年12月のConstruction Productivity Advancement Research(CRAP) Programに“Evaluation of Application of DELVO technology”として報告されている。

一方で、National Ready Mixed Concrete Associationでは、トラックミキサ運転手用マニュアルに、生コン車のドラムの洗浄方法について記載されており、再利用混和剤(Recycle Admixtures)を用いた戻りコンの取り扱い方法やドラム内の付着モルタルの使用方法に関する報告がなされている。

近年、この化学処理剤は2002年から2008年にかけて約2倍の売上となっており、戻りコンの安定化、付着モルタルの安定化の他、コンクリートの経時保持の改善や凝結時間のコントロールにも使用されており、現在も継続的に使用されているようである。

米国ではコンクリートに使用する水に関して、表2.1に示すようにASTM C 94(Standard Specification for Ready-Mixed Concrete)に規格が記載されている。これによると回収水(Recycle Water)の使用は認められており、この詳細はASTM C 1602(Specification for Mixing Water used in the Production of Hydraulic Cement Concrete)に記述されている。これによると、塩化物イオン量、硫酸イオン量、アルカリ量、固形分量およびそれらを用いた圧縮強度比、凝結時間の差を満足すること、ならびに水の密度を満足することにより使用できるとされている。

スラッジ固形分の使用量については、ASTM C 1602に記載されており、スラッジ水の固形分濃度が50,000ppm以下のものが使用可能であることから、単位水量の5%未満の使用が認められている<sup>5)</sup>。

以上から、米国では化学処理剤を用いた技術が普及しており、表2.1にあるASTMの規格からも回収水、付着モルタルおよび戻りコンについても規格が整備されているようである。

表 2.1 各国の規格

規格	JIS	ASTM	EN	ISO
レディーミクストコンクリート	JIS A 5308	ASTM C 94/C 94M	EN206	ISO22965
練混ぜ水(回収水)	JIS A 5308 附属書C	ASTM C 1602/C 1602M	EN1008	ISO12439
付着モルタル	JIS A 5308 附属書D	National Ready Mixed Concrete Associationのトラックミキサ運転手用マニュアル	-	-
戻りコン	-	National Ready Mixed Concrete Associationのトラックミキサ運転手用マニュアル	-	-

### 2.3.2 欧州

欧州においても米国での当該技術が注目されており、特に、生コン車の付着モルタルの再利用技術が注目されていた。

ドイツでは、1990年に米国の技術が導入され、生コン100社以上がこの技術を採用していた。また、イタリアにおいても生コン120社程度が採用していたと報告されている。

英国では、1990年代前半に、水やコンクリートを生コン車のドラム内に一晩置いておくことは認められていなかったが、1995年に混和剤メーカーがBBA(British Board of Agreement)を取得し、その普及を図っていた。

オランダでは、1991年にオランダコンクリート協会の“The Official Certificate Institute”から認定書が授与され、同様に普及活動が行われていた。現在においても、EN206(表2.1)内に付着モルタルの使用法や戻りコンの再利用方法についての記載はない。

また、欧州で引用される規格には、EN(European Norm)とISO(International Organization for Standardization)が主となる。以下にENとISOの関連技術についてまとめる。

#### (1) EN(European Norm)

コンクリートに使用する水に関して、ENではEN206に記載されている。これによると、回収水(Recycle Water)の使用は認められており、この詳細はEN1008に規格化されている。ここでは、塩化物イオン量、硫酸イオン量、アルカリ量、糖分量、リン酸塩量、硝酸イオン量、鉛イオン量、亜鉛イオン量およびそれらを用いた圧縮強度比、凝結時間の差を満足することにより使用できると記述されている。

#### (2) ISO(International Organization for Standardization)

ISOでは、ISO 22965-1(Concrete-Part1:Methods of specifying and guidance for the specifier)およびISO 22965-2(Concrete-Part2:Specification of constituent materials, production of concrete and compliance of concrete)(2007年に制定)に記載されている。これらによると、回収水(Recycle Water)の使用は認められており、ISO 12439(Mixing water for concrete)(2010年に制定)に規格化されている。この内容はEN 1008とほぼ同様であり、これによると、塩化物イオン量、硫酸イオン量、アルカリ量、糖分、リン酸塩、硝酸イオン量、鉛イオン量、亜鉛イオン量およびそれらを用いた圧縮強度

比、凝結時間の差を満足することにより使用できるとされている。

スラッジの使用量については、ISO 12439 Annex A “Requirements for the use of water recoverd from processes in the concrete industry”に記載されている。これによると、スラッジ固形分は、全骨材の1%未満の量まで使用が認められている<sup>5)</sup>。

以上から、欧州では米国の技術が導入されており、欧州で引用される規格は、EN と ISO である。EN および ISO では、回収水の使用は認められている。またスラッジの使用については、ISO12439 に記載されており、スラッジ固形分は、全骨材の1%未満の量まで使用ができるとされている。

### 2.3.3 韓国

韓国の生コン工場では回収水を上澄み水と固形分に分離し、上澄み水は生コンの練混ぜ水に再利用され、固形分は定期的に処理されている。この固形分の処理費用は約 16,000 ウォン/t となっている。なお、韓国では、回収水をフィルタープレスで脱水し、固形分を分離することなく、そのままコンクリートの練混ぜ水に再利用している例もある。そのため日本のようにスラッジや脱水ケーキの廃棄処理が問題になることはないようである。

韓国においても残コン・戻りコンの処理は日本と同様生コン工場側に負わされているが、出荷された生コンは建設現場でできるだけ消費されており、日本のように戻りコンとして処理問題が発生することは比較的少ないようである。ただし、最近では、現場における生コンの品質管理規準が強化されるようになったため、戻りコンが生じるケースも増え始めている。

また、戻りコンを洗浄して骨材を回収し、この回収骨材は全量が生コンに再利用されている。韓国では粗骨材の岩種が花崗岩 1 種類しか使用されておらず、花崗岩はアルカリシリカ反応などをほとんど起こさないことも再利用が進んでいる理由と考えられている。なお、回収骨材の生コンへの再利用は、韓国の生コン規格に適合しない点があるが、大部分の工場では回収骨材を再利用する現実が存在しており、韓国の生コン規格を遵守している生コン工場もあるため、すべての工場で、このような運用がなされているわけではないようである。

以上から、韓国では、工事現場内で生コンがほぼ消費されるため、戻りコンの発生量自体が少なく、回収水の完全利用が進んでおり、スラッジ自体の発生が少ない。また戻りコンからの回収骨材は、国内で使用される粗骨材岩種が 1 種類に限定されており、劣化リスクも少なく、回収骨材の利用が進んでいる。これらから戻りコン処理があまり大きな問題とはなっていない状況である。

### 2.3.4 中国

中国では、質量の30%以上が副産物で構成される場合、6%の税金優遇制度がある。よって、コンクリートの性能向上を目的としてフライアッシュが有効利用されることは、生コ

ン工場の増益にもつながる。なお、スラグはリサイクル品には該当せず、逆に砕砂は碎石生産時の副産物としてリサイクル品に該当するようである。

日本および韓国と同様に中国でも、残コン・戻りコンの処理は生コン工場側に負わされているが、出荷された生コンは建設現場でできるだけ消費されており、問題が発生することは少ない。また、戻りコンを洗浄して骨材を回収し、この回収骨材は全量が生コンに再利用されている。元々の骨材品質が悪いことから、回収骨材の物性に対する拘りは小さい。さらに回収水は、フィルタープレスで脱水し、スラッジ固形分を分離することなく、そのままコンクリートの練混ぜ水として再利用されている。この際、回収水中の固形分と液体の割合は、ある程度の頻度で試験室において確認をし、再利用の際の配合修正に活用されている。また、24 時間体制で生コンが製造されていることから、回収骨材や回収水は、長時間に亘り貯留されることなく再利用されている。

以上から、中国では、韓国と同様に工事現場内で出荷生コンが消費されるため、残コン・戻りコンの発生量自体が少なく、回収水の完全利用が進んでおり、スラッジ自体の発生は少ないようである。また戻りコンから回収した回収骨材の品質に対する拘りは小さく、回収骨材の利用が進んでいる。さらに生コン工場の設備規模が極めて大きく、24 時間に亘り製造されるため、リサイクル材料を工場内で完全消費しやすい。これらから戻りコン処理が大きな問題とはなっていない状況である<sup>5)</sup>。

以上から、海外における戻りコンの状況を調査したが、北米や欧州では化学処理剤を用いた戻りコンの有効利用の取組が行われている。一方で韓国や中国では、生コンは建設現場でできるだけ消費されるため戻りコン量が少なく、回収水、回収骨材の利用が進んでいるため、戻りコン処理が大きな問題とはなっていないようである。

## 2.4 戻りコンクリートに関連する JIS 規定の現状

### 2.4.1 スラッジ水

戻りコンから回収したスラッジ水は、JIS A 5308 付属書 C の生コンの練混ぜに用いる水の回収水に規定されており、レミコン工場において、洗浄によって発生する排水のうち、運搬車、プラントのミキサ、ホッパなどに付着及び残留したフレッシュコンクリート、並びに戻りコンの洗浄排水(以下、コンクリートの洗浄排水と称す)を処理して得られるもの、と定義されている<sup>6)</sup>。

### 2.4.2 トラックアジテータのドラム内に付着したモルタル

普通コンクリート及びこれを流動化したコンクリートの荷卸しを完了し、全量を排出した後のトラックアジテータ(以下、アジテータと称す)のドラム内壁、羽根などに付着し

ているフレッシュモルタルを，この付属書に規定する付着モルタル安定剤を用いてスラリー状にし，新たに積み込むコンクリートと混合して使用方法について，JIS A 5308 付属書 D に規定している<sup>6)</sup>。

### 2.4.3 回収骨材

戻りコンから回収した回収骨材は，JIS A 5308 の 8.5 に規定されており，戻りコン並びにレミコン工場において，運搬車，プラントのミキサ，ホッパなどに付着及び残留したフレッシュコンクリートを清水又は回収水で洗浄し，粗骨材と細骨材に分別して取り出したもの，と定義されている<sup>6)</sup>。

## 2.5 戻りコンクリートの有効利用に関する既往の研究

### 2.5.1 戻りコンクリートから回収したスラッジ水

スラッジ水に関する研究では，入江らはスラッジ水に凝結遅延効果を持つ安定剤を加えて水和反応を抑制したスラッジ水を練混ぜに用いた夏期コンクリートの品質等について検討した。その結果，安定剤を用いて水和反応を抑制したスラッジ水を練混ぜ水として用いた場合，35℃の環境下においてもスラッジ水中の固形分を，セメントとして置換できる可能性が示された<sup>2)</sup>。

齊藤らは，種々の有機系混和剤を添加したスラッジ水を用いたモルタルのフレッシュ性改善効果とその評価手法について検討した。その結果，スラッジ水にセメントの水和を抑制する効果のある混和剤を添加し，水和を抑制することで，モルタルのフレッシュ性を改善することが可能である。その効果は，スラッジ水の懸濁層の容積割合で評価することが妥当であることが示された<sup>7)</sup>。

砂田らは，凝結遅延剤を添加したスラッジ水を用い，W/C，スラッジ固形分率等を変化させ，コンクリートによる検討を行った。その結果，スラッジ固形分の強熱減量が 3%程度以下であればスラッジ固形分率 9%まで，強熱減量が 5%程度以下であればスラッジ固形分率 3%までをセメントと置き換えて使用してもコンクリートの品質に悪影響を及ぼさないことを示した<sup>8)</sup>。

### 2.5.2 戻りコンクリートから製造した乾燥スラッジ微粉末

乾燥スラッジ微粉末に関する研究では畑中らが，スラッジケーキの有効利用を目的として，高炉水砕スラグと乾燥スラッジとの反応性について検討した<sup>9)</sup>。その結果，乾燥スラッジの活性度は 40～55%得られ，加熱処理温度の差はあまり見られなかった。また水砕スラグの潜在水硬性は，乾燥スラッジから供給されるアルカリ刺激でほぼ十分に発揮できることが示された。

一方、佐藤らは、風力式粉碎機で丸みを帯びた微粉碎乾燥スラッジ（以下、PDS と称す）を製造し、これを用いた高流動コンクリートについての報告した<sup>10)</sup>。その結果、PDS をコンクリート用混和材料として用いた場合、PDS 混入率 10%程度まで使用が可能であることがわかった。

### 2.5.3 戻りコンクリートのその他の有効利用に関する研究

その他の有効利用として、渡邊らは戻りコンに超遅延剤と流動化剤を添加した後にウェットスクリーニングして得られるモルタル分をポンプ圧送用先送り材に適用できることを示した<sup>11)</sup>。金子らは、戻りコンから回収したスラッジ水、回収細骨材等を高流動埋戻し材として有効利用し、実現場での打設を行っている<sup>12)</sup>。清野らは、スラッジに汚泥用の中性化固化材を用いて中性化固化処理土を製造し、それを再利用するのに必要とされる強度の発現や、有害物質である六価クロムの溶出量について環境基準をクリアできることを報告した<sup>13)</sup>。

## 2.6 環境負荷低減型コンクリートに関する既往の研究

### 2.6.1 ジオポリマーコンクリート

ジオポリマーに関する研究では一宮らは、アルミナシリカ粉末にはフライアッシュと高炉スラグ微粉末、アルカリ溶液にはケイ酸ナトリウムと水酸化ナトリウムの水溶液を用いてモルタルを製造し、フロー試験ならびに強度試験を行った。その結果、ジオポリマーコンクリートの配合設計理論構築のための基礎的な知見を得た<sup>14)</sup>。

公益社団法人日本コンクリート工学会は、「建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会」より 2017 年 9 月に報告書が発刊された。ここでは、ジオポリマーの定義や反応メカニズム、力学特性、耐久性などのとりまとめや、国内および海外でのジオポリマーの実用例のとりまとめなどが行われ、報告された<sup>15)</sup>。

### 2.6.2 環境負荷低減型コンクリート

環境負荷低減型コンクリートに関する研究では片野らは、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ、シリカフェームを混和材として高含有したコンクリートについて、室内試験および暴露試験を行い、強度および耐久性について検討した。その結果、混和材を高含有したコンクリートは、水結合材比を小さくすることで圧縮強度は得られること、乾燥収縮を抑制できることが明らかとなった。また、中性化の進行は一般のコンクリートよりも速いものの、水結合材比を小さくすることである程度抑制できること、塩化物イオンの侵入や凍結融解に対する抵抗性は一般のコンクリートと同等以上となることが明らかとなった<sup>16)</sup>。

和地らは、高炉スラグ微粉末を 60%程度含有するセメントに対して、SO<sub>3</sub>量が圧縮強度、

乾燥収縮，自己収縮，中性化等に及ぼす影響を実験的に検討した。強度発現特性においては，SO<sub>3</sub>量が初期強度を増進させる一方で長期強度を抑制した。乾燥収縮はSO<sub>3</sub>量の増加に伴い減少する傾向であり，その要因の一つとして，細孔径分布の影響が考えられた。また，SO<sub>3</sub>量の増大は膨張特性を付加するため，自己収縮の抑制効果を導く。中性化特性にはSO<sub>3</sub>量よりもW/Cが大きく影響し，W/Cの範囲によっては一般構造物に適用可能であると推定された<sup>17)</sup>。

松家らは，フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の組合せによるコンクリートの一般性能および環境性能の最適化を図るための基礎的な情報を得るために，上記の混和材の利用がコンクリートのフレッシュ性状および硬化特性に及ぼす影響と環境負荷低減効果について明らかにすることとした。その結果，フライアッシュ置換率20%および高炉スラグ微粉末置換率30%までの併用は，混和材無混入と比べて初期強度を低下させるが，材齢28日の強度やコンクリートのフレッシュ性状ならびに耐久性は同等程度の性能であること，およびコンクリートの圧縮強度あたりのCO<sub>2</sub>排出量が減少することが明らかとなった<sup>18)</sup>。

## 2.7 まとめ

本章で得られた結論を以下に示す。

- (1) 国内における戻りコンの現状では，戻りコンから回収したスラッジ水，回収骨材は普及が進んでいない。またそれ以外の有効利用についても普及が進んでおらず，ほとんどが廃棄処理されている。
- (2) 海外における戻りコンの現状では，米国や欧州では化学処理剤を用いた戻りコンの有効利用の取組が行われている。一方で韓国や中国では，生コンは建設現場でできるだけ消費されるため戻りコン量が少なく，回収水，回収骨材の利用が進んでいるため，戻りコン処理が大きな問題とはなっていない。
- (3) 戻りコンの有効利用に関する既往の研究では，乾燥スラッジの反応性と，風力粉碎機で丸みを帯びた微粉碎乾燥スラッジを製造し，高流動コンクリートに10%程度まで使用可能であることが報告されており，本研究の乾燥スラッジ微粉末は処理までの時間を短縮し，未水和セメント分を多く残すことを特徴とし，基礎物性の解明や品質向上または生コンに20~30%まで使用できることを示し，実機への適用を新たに行っている。
- (4) 環境負荷低減型コンクリートに関する既往の研究では，ジオポリマーコンクリートおよび環境負荷低減型コンクリートは中性化抵抗性が低下することが報告されている。

## 参考文献

- 1) 全国生コンクリート工業組合連合会：生コン産業におけるリサイクルの普及に向けて，第18回生コン技術大会パネルディスカッション，pp.7，2015.4
- 2) 入江一次，砂田栄治，伊藤司，山之内康一郎，橋爪翔：スラッジ水の高度利用に関する研究，第19回生コン技術大会，pp.105-108，2017.4
- 3) 福島和将，岡沢智，大川裕：安定化剤を添加したスラッジを用いたコンクリートの基本性状について，高性能AE減水剤を用いた場合の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集A-1，pp.277-278，2000.9
- 4) 国土交通省総合政策局建設振興課労働資材対策局：残コン・戻りコンの発生抑制，有効利用に関するアンケート調査の結果概要について，国土交通省，2006
- 5) 日本コンクリート工学会：残コン・戻りコンの発生抑制及び有効利用に関する技術検討委員会報告書，pp.207-212，2012.1
- 6) 一般財団法人日本規格協会：JISハンドブック10生コンクリート，2017.6
- 7) 斉藤忠，高田元気，藤井隆史，綾野克紀：有機系混和剤を添加したスラッジ水を用いたモルタルのフレッシュ性状改善効果とその評価方法に関する研究，Vol.35，No.1，pp.217-222，2013.7
- 8) 砂田栄治，吉井博，西村正，佐藤立美：結合材として用いるスラッジ固形分の有効利用に関する実験的研究，Vol.31，No.1，pp.1879-1884，2009.7
- 9) 畑中重光，近原典子，湯浅幸久：乾燥微粉碎した生コンスラッジの活性度と有効利用に関する一考察，セメント・コンクリート論文集，No.51，pp.470-475，1997
- 10) 佐藤嘉昭，劉嘉銘，清原千鶴，田口茂久：微粉碎乾燥スラッジ(PDS)のコンクリート材料としての用途開発に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.13，No.1
- 11) 渡邊真央，中田善久，川野辺正徳，高野肇，女屋英明，斉藤丈士：戻りコンクリートをウェットスクリーニングして得られるポンプ圧送用先送りモルタルの実用化に関する実験的研究，「残コン・戻りコンの発生抑制と有効利用」に関するシンポジウム，pp.65-70，2010.2
- 12) 金子敬佑，飯田義憲，渡邊勝：生コン製造に伴い発生する産業廃棄物の有効活用，第19回生コン技術大会，pp.93-98，2017.4
- 13) 清野直樹，庄司充，磯部隆，村山吉衛，早川徹：生コン工場から発生する汚泥(スラッジ)の有効利用II，第18回生コン技術大会，pp.197-202，2015.4
- 14) 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，Vol.33，No.1，pp.575-580，2011.7
- 15) 公益社団法人日本コンクリート工学会：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017年9月
- 16) 片野啓三郎，竹田宣典，小林利充，中村英佑：混和材を高含有したコンクリートの耐久

性に関する検討, Vol.36, No.1, pp.658-663, 2014.7

- 17) 和地正浩, 米澤敏男, 三井健郎, 井上和政: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの物性に及ぼす  $\text{SO}_3$  量の影響, Vol.33, No.1, pp.203-208, 2011.7
- 18) 松家武樹, 堺孝司, 鈴木康範, 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の諸特性, Vol.32, No.1, pp.185-190, 2010.7

# 第 3 章

---

DSP の基礎物性および品質管理手法に  
関する研究

## 第3章 DSPの基礎物性および品質管理手法に関する研究

### 3.1 はじめに

本章では、戻りコンから製造した DSP の特性を明らかにするため、基礎物性に関する検討を行った。また DSP の品質向上を目的とし、遅延剤添加の効果および DSP の品質に及ぼす分級や粉砕の影響について検討した。さらに原料が戻りコンであることからその配合や処理までの経過時間等が DSP の品質に影響することが想定されるため、実務での DSP の品質管理手法を確立することを指向し、実機プラントを用いた DSP の製造実験を行い、品質管理手法を提案する。

### 3.2 DSP の製造方法

DSP の製造工程を図 3.1 に示す。DSP は、戻りコンから骨材を分級し、残余のスラッジ水をフィルター加圧装置で脱水後、破砕攪拌翼付きスラッジ乾燥機（乾燥温度：120～130℃）を用いて含水率が 1～2%程度となるまで乾燥・破砕処理して製造したものである。この処理を戻りコンが発生した当日に行うことで、未水和セメントの含有率を高くすることができ、OPC の 5～6 割程度の強度発現性を有した高品質の DSP が得られる。製造した DSP は比表面積で 3 種類に区分し、比表面積が 5000～8000cm<sup>2</sup>/g を DSP-L、8000～10000cm<sup>2</sup>/g を DSP-M、10000cm<sup>2</sup>/g 以上を DSP-H とし、セメントサイロに保管する。なお、戻りコンはコンクリート施工時に残余したもの、ホッパーや配管などに残ったものおよび荷卸し時に不合格となった生コンを対象とした。

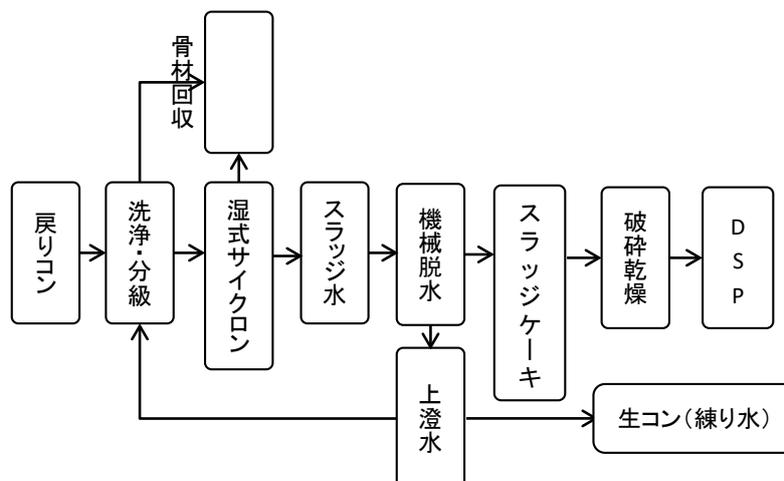


図 3.1 DSP の製造工程

### 3.3 DSP の基礎物性

#### 3.3.1 DSP の密度、強熱減量、比表面積試験

DSP の物性は処理工程が同一の場合、DSP 製造までの時間とコンクリート温度に影響されるものと考えられ、生コン製造時の平均外気温と実製造した DSP の密度、強熱減量および比表面積について当日処理した DSP と翌日処理した DSP を 1 年間測定した結果を図 3.2 に示す。それぞれの測定方法は JIS R 5201 および JIS R 5202 に準拠して行った。なお、翌日処理した DSP とは、戻りコン等の骨材を回収し、残ったスラッジ水を水槽に貯留し、翌日同様に処理したものである。図より当日処理した DSP の密度、強熱減量および比表面積と平均外気温には高い相関関係が認められ、平均外気温が低いほど、DSP の密度は大きく、強熱減量および比表面積は小さくなった。これは、平均外気温の相違により、DSP の原料である戻りコンに含有するセメントの水和反応の進行度合いに差が生じ、未水和セメントの残存量は外気温が低いほど多くなっているためであると考えられる。また翌日処理した

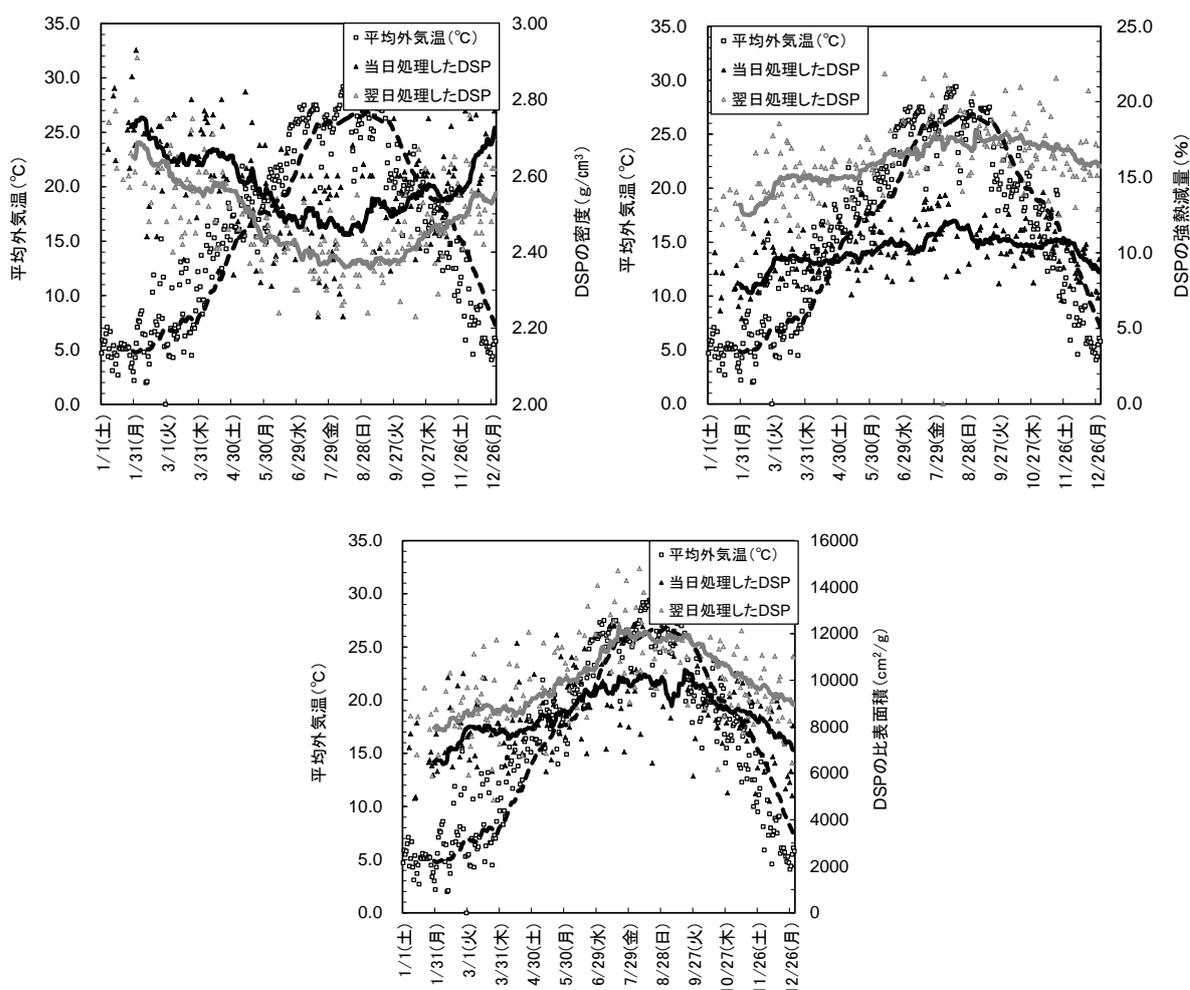


図 3.2 DSP の密度、強熱減量、比表面積

DSP は、密度は  $0.2(\text{g}/\text{cm}^3)$ 程度小さく、強熱減量は  $5(\%)$ 程度、比表面積は  $2000(\text{cm}^2/\text{g})$ 程度大きくなった。これは外気温の相違の場合と同様に未水和セメントの残存量が処理までの時間が長いほど少なくなるためであると考えられる。これらより、DSP は処理までの時間と平均外気温により、未水和セメントの残存量が異なるものと考えられる。

### 3.3.2 DSP の粒度分布

比表面積の異なる DSP (3種類)、OPC および早強ポルトランドセメント (以下、H と称す) のレーザー回折式粒度分布測定結果を図 3.3 に示す。図の凡例に記載されたカッコ内の数値は、比表面積の値を示す。図より OPC の粒度分布は  $30\mu\text{m}$  程度、H の粒度分布は  $20\mu\text{m}$  程度を中心とした山状の粒度分布であるのに対し、DSP は  $30\mu\text{m}$  程度のピークの他に  $300\mu\text{m}$  程度の頻度も高く 2 山状の粒度分布であることが確認された。通常、比表面積が大きいということは、図の OPC と H のように粉体の粒子が細かいことを意味するが、DSP の比表面積は大きくなるに従い、 $30\mu\text{m}$  程度の頻度は低下し、 $300\mu\text{m}$  程度の頻度は増大する結果となった。これはセメント粒子が凝集したものや細骨材の微粒分の一部が含まれているものが影響したと考えられる。またレーザー回折式の粒度分布では凝集した顆粒状のものを 1 粒子として測定しているが、ブレン空気透過法による比表面積では凝集構造を成している各微細粒子を計測しているためであると考えられる。

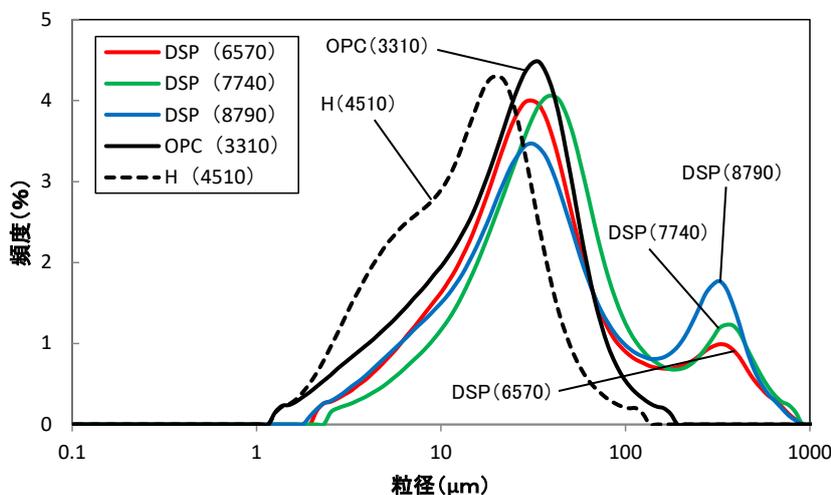


図 3.3 DSP の粒度分布

### 3.3.3 DSP の SEM 画像

DSP および OPC の SEM 画像を図 3.4、図 3.5 に示す。図より DSP には、未水和セメント、細骨材の微粒分の一部および水和生成物の凝集したものが含まれていることが観察された。DSP は  $100\mu\text{m}$  以上の凝集した粒子が確認されており、上述の粒度分布測定結果と合致する。

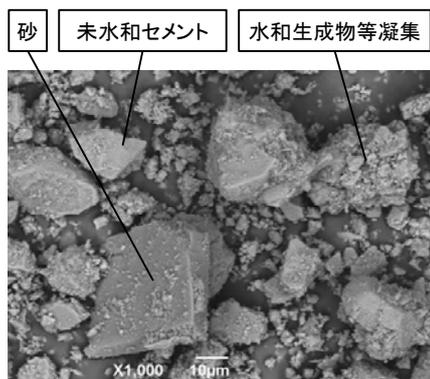


図 3.4 DSP の SEM 画像(5960cm<sup>2</sup>/g)

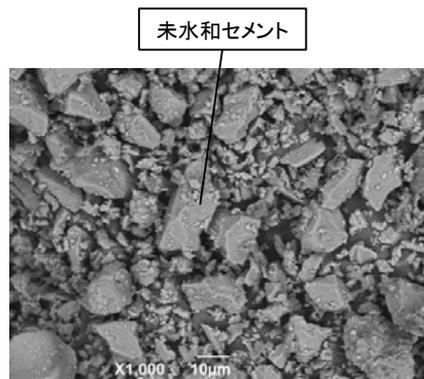
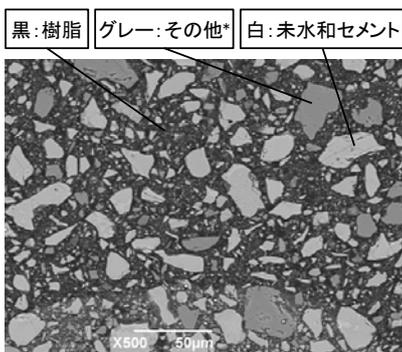


図 3.5 OPC の SEM 画像 (3300cm<sup>2</sup>/g)

### 3.3.4 DSP の未水和セメント量

比表面積が異なる 4 種類の DSP について、走査型電子顕微鏡 (SEM) およびエネルギー分散型 X 線分析 (EDX) により、DSP の成分分析を行った。エポキシ樹脂と粉体を練り混ぜ DSP のエポキシ樹脂混合試料による SEM 画像を二値化することにより、DSP の未水和セメント量を定量化した。DSP および OPC のエポキシ樹脂混合試料による SEM 画像を図 3.6 および図 3.7 に示す。この SEM 画像を二値化することにより、図 3.8 および図 3.9 の



\*: 砂、水和生成物、石膏、炭酸カルシウム等

図 3.6 DSP の樹脂混合 SEM 画像(5960cm<sup>2</sup>/g)

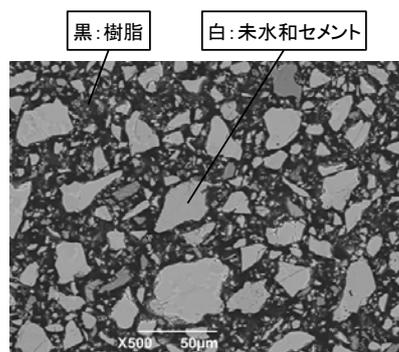


図 3.7 OPC の樹脂混合 SEM 画像(3300cm<sup>2</sup>/g)

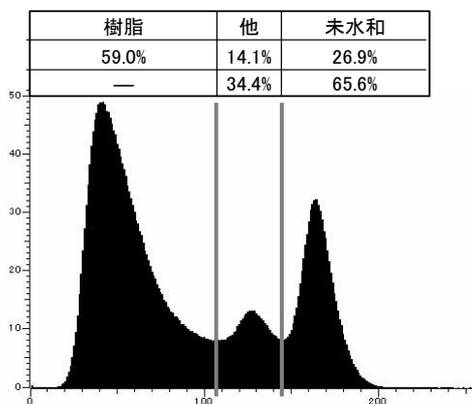


図 3.8 DSP の SEM 画像二値化による成分  
(5960cm<sup>2</sup>/g)

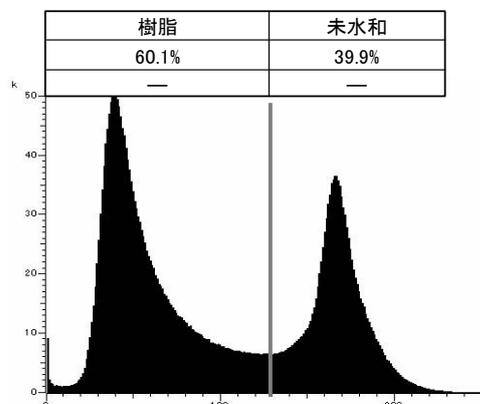


図 3.9 OPC の SEM 画像二値化による成分  
(3300cm<sup>2</sup>/g)

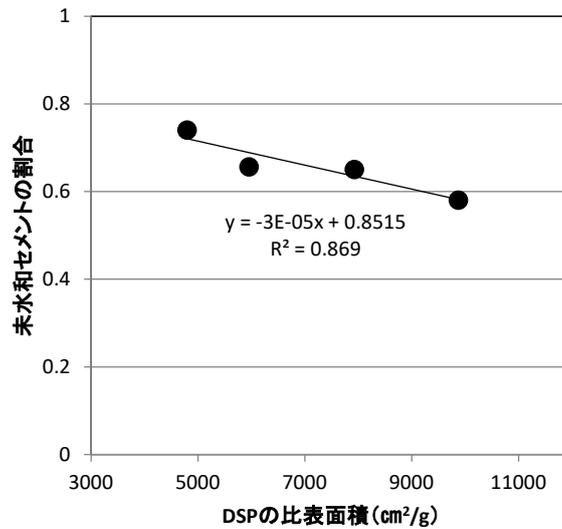


図 3.10 DSP 比表面積と未水和セメント量

様に DSP の未水和セメント量を定量化した。DSP の比表面積と未水和セメント量の関係を 図 3.10 に示す。図 3.10 から、DSP の比表面積が大きくなるに従い未水和セメント量が減少する傾向が認められた。また、DSP 中の 35%程度は砂や水和生成物などであり、強度に寄与しないと考えられる成分が一定程度存在することも確認された。これは後ほど説明する 図 3.23 と同様な傾向であり、比表面積が大きくなるほど、未水和セメント量が小さくなっている。

### 3.3.5 DSP に含まれる微砂分含有量試験

DSP に含まれる微砂分量を把握するため、「スラッジ固形分中の砂分含有率試験方法 (ZKT-103)」<sup>1)</sup> (以下、ZKT 法と称す) と、DSP は原料である戻りコンに石灰砕砂が含ま

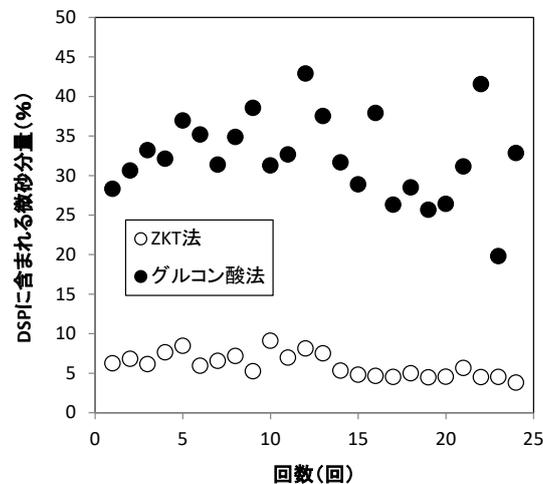


図 3.11 DSP の微砂分量

れていることから「グルコン酸ナトリウムによる硬化コンクリートの単位セメント量試験方法 (NDIS 3422 : 2002)」<sup>2)</sup> (以下, グルコン酸法と称す) による方法においても検討した。

DSP に含まれる微砂分量を図 3.11 に示す。図より ZKT 法における微砂分量は 5~10% 程度, グルコン酸法では, 20~40% 程度であった。これは 3.3.4 の強度に寄与しないと考えられる成分と同様な結果となった。

### 3.3.6 DSP の化学成分および鉱物組成

結合材の化学成分を表 3.1 に, 鉱物組成を表 3.2 に示す。表の DSP 鉱物組成は, 粉末 X 線回折 (XRD) リートベルト法解析を行ったものである。リートベルト解析のため実施した X 線回折装置 (XRD) による測定は, ターゲット CuK $\alpha$ , 管電圧 40 kV, 管電流 15 mA, 走査範囲 5~70deg.(2 $\theta$ ), ステップ幅 0.02 deg.を条件とし, 回転試料台と高速半導体検出器を用いた。リートベルト解析は SIROQUANT Ver.3 を用いた。その他 XRD 測定およびリートベルト解析における詳細については参考文献 3) を参照されたい。

表 3.1 DSP および OPC の化学成分

記号	化学成分 (%)							密度 g/cm <sup>3</sup>	比表面積 cm <sup>2</sup> /g
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	ig.loss		
DSP-L	20.00	5.29	2.80	58.40	1.16	2.14	9.60	3.00	5480
DSP-M	18.70	5.21	2.38	54.10	1.27	1.31	11.65	2.92	7700
OPC	20.68	5.28	2.91	64.25	1.40	2.10	1.80	3.16	3260

表 3.2 DSP および OPC の鉱物組成

記号	鉱物組成 (%)				密度 g/cm <sup>3</sup>	比表面積 cm <sup>2</sup> /g
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF		
DSP-L	35.9	14.2	6.7	4.4	3.00	5480
DSP-M	31.7	17.4	6.0	4.3	2.92	7700
OPC	58.7	15.1	9.1	8.8	3.16	3260

### 3.3.7 DSP の六価クロム溶出量

図 3.12 は OPC, 高炉セメント B 種 (以下, BB と称す) および DSP の密度と六価クロム溶出量を示したものである。図より DSP の六価クロム溶出量は OPC<sup>4)</sup> や BB<sup>4)</sup> と比べ大幅に小さい値となった。また, DSP の密度が小さいものの方が六価クロム溶出量が低くなる傾向が認められた。しかし, 当日処理したものと翌日処理したものを比較すると, それらの溶出量には明確な差が見られなかった。これらは原料である戻りコンの処理時において図 3.1 に示す機械脱水工程で発生する上澄水に六価クロムが溶出したためであると考えられる。

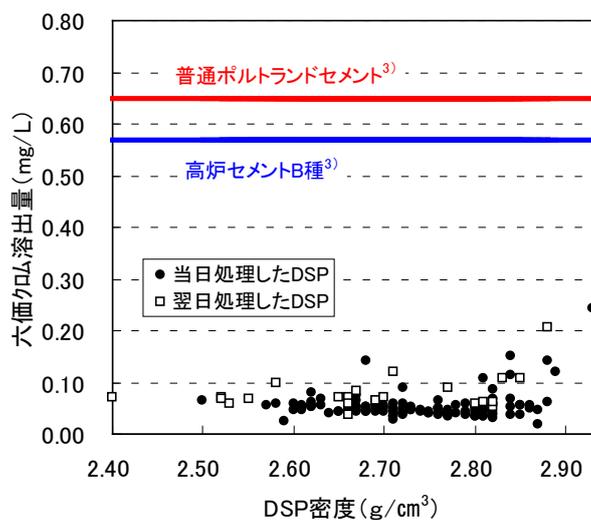


図 3.12 DSP 密度と六価クロム溶出量

### 3.4 DSP の品質向上手法に関する研究

#### 3.4.1 遅延剤による品質向上手法

##### (1) DSP の強度発現性

DSP を用いたモルタルに関し、フレッシュおよび強度発現性の試験を行った。モルタルの配合条件は、水結合材比(W/DSP)=50%、細骨材結合材比(S/DSP)=3.0 である。細骨材はセメント協会標準砂を用いた。なお、DSP は比表面積が異なる複数を用い、評価試験を行った。また目標フロー値を  $170 \pm 30 \text{mm}$ 、目標空気量を  $6.5 \pm 2.0\%$  とし、この値となるよ

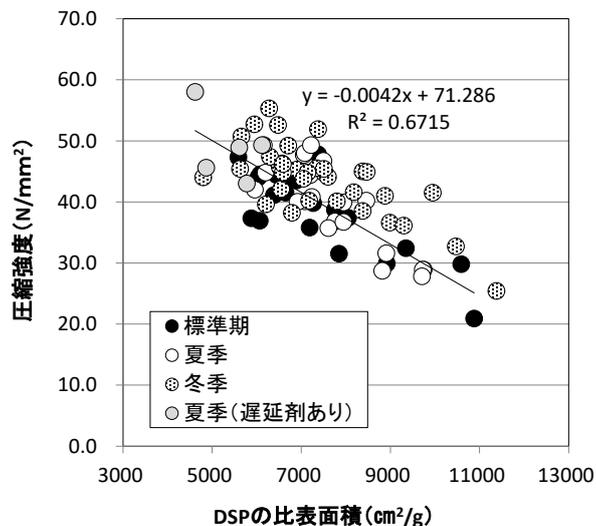


図 3.13 モルタル圧縮強度

うに混和剤を添加した。

DSP の比表面積と DSP を用いたモルタルの材齢 28 日の強度試験結果に、さらに DSP の製造時期と遅延剤の有無を記載したものを図 3.13 に示す。図より DSP を用いたモルタルの材齢 28 日圧縮強度は、 $20\sim 60\text{N/mm}^2$  程度の範囲であった。これは OPC が材齢 28 日で  $63\text{N/mm}^2$  程度であることから、DSP は OPC との強度比で  $0.3\sim 0.9$  程度となった。また DSP の比表面積が大きくなるほど、強度は小さくなった。図より DSP の製造時期による影響は、標準期(4・5・10 月)、夏季(6~9 月)および冬季(11~3 月)についても比表面積で管理できることが明確となった。さらに夏季に遅延剤を利用することにより、比表面積が小さく、圧縮強度が大きい DSP を製造することが可能であった。

## (2) DSP の水和発熱特性

W/C : 55%とし、DSP と水の重さが 4g となるように電子天秤で計量し、注水後 30 秒間練混ぜした。その後、コンダクションカロリメーターを用い、一定温度( $20^\circ\text{C}$ )で注水直後から材齢 48 時間までの水和発熱を計測した。比表面積ごとの水和反応熱の結果を図 3.14 に示す。図のピークの値は  $\text{C}_3\text{S}$ (エーライト)の水和反応活性の挙動を示している<sup>5)</sup>。比表面積が小さくなるほどピークの値は大きくなり、強度発現の小さい 8920 や 10590 では、水和反応活性の挙動がほとんどみられないのを確認した。比表面積 5430 は、処理工程で遅延剤が混入しているためピーク値が他の DSP に比べ遅くなり、初期の水和反応を抑えられているのがわかる。上記の遅延剤を混入した DSP を除くと、接水から 5~8 時間程度でピークを迎えている。これは DSP の原料である戻りコンが水和初期に石膏を消費していることが影響したものと考えられる。また OPC に着目すると、接水から 12 時間でピークを迎えていることから、戻りコンが OPC から生成された DSP は、水和反応が活性化する 12 時間以前に処理工程を行うことで、強度発現の大きい DSP を生成することができると考えられる。

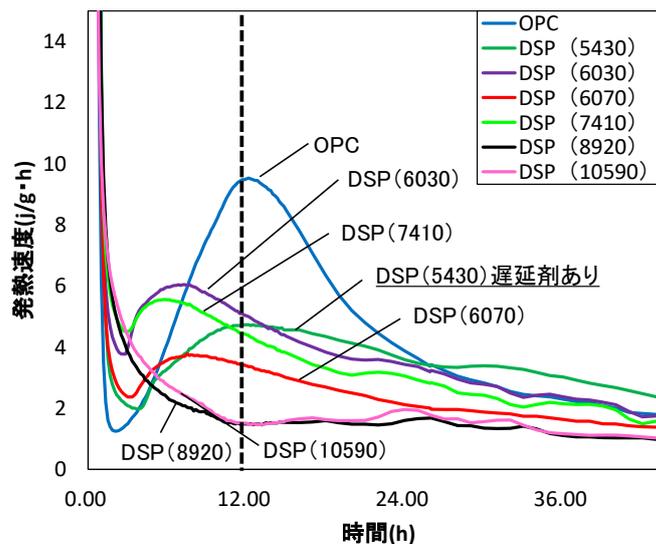


図 3.14 DSP の水和発熱特性

### (3) DSP の凝結特性

比表面積が異なる DSP と OPC に関しセメントの凝結試験 (JIS R 5201) に準拠して行った。DSP の比表面積と凝結時間を図 3.15 に示す。図より、DSP の始発時間は比表面積に拘らずおおむね 60 分以下、終結時間は、2 時間半～6 時間程度であった。OPC と比較すると、始発時間が早くなり、終結時間はばらつきがあるものの同程度と考えられる。また図の点線は OPC の始発時間の JIS 規格値を示すが、DSP はそれよりも早くなっていることがわかる。これは、DSP の石膏が消費されていることが影響しているものと考えられる<sup>5)</sup>。一方、遅延剤を用いた DSP はわずかではあるが他の DSP と比べ始発時間が遅くなった。これは前述と同様に、遅延剤により石膏の残存量や遅延剤成分の残留が影響したものと考えられる。ただし今回行った遅延剤を用いた DSP のデータが少ないため、今後検討が必要であると考えられる。

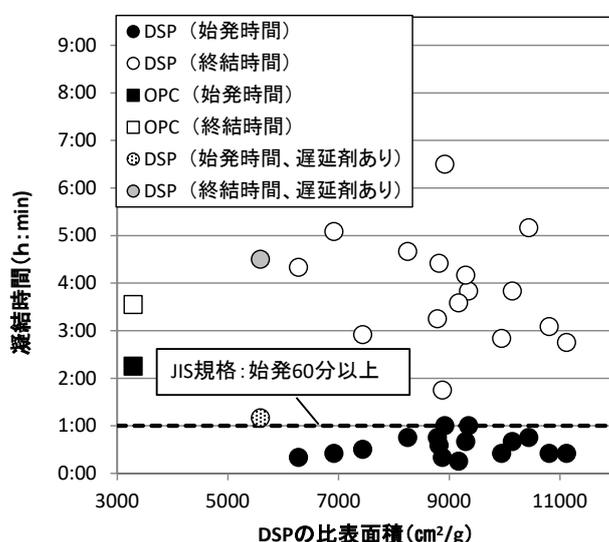


図 3.15 DSP の凝結時間

### 3.4.2 DSP の分級・粉砕による品質向上手法

#### (1) DSP の分級、粉砕実験概要

DSP の品質向上を指向し、分級および粉砕した微粉末の諸特性について検討した。分級試験では DSP の比表面積の異なる 2 種類について、ふるい目開き 106 $\mu$ m の超音波振動ふるい機を用い、100 $\mu$ m 程度を境に分級した。分級後の試料は 100 $\mu$ m 以下のもの (pass) と 100 $\mu$ m 超のもの (on) とに区分けした。粉砕試験では、DSP に中ブレン品 (比表面積 8520cm²/g) を用い、ボールミルおよびジェットミルを用いてそれぞれで粉砕した。ボールミルでは、鉄球を  $\phi$  20mm $\times$ 5kg+ $\phi$  40mm $\times$ 10kg の計 15kg 投入し、DSP を 20kg 投入後、15 時間粉砕した。ジェットミルでは、風力により粒子同士を衝突させ粉砕を行い、40kg/h の条件で粉砕した。

## (2) 分級、粉砕した DSP の実験方法

### a) 分級シリーズ

分級シリーズでは、DSP の密度試験 (JIS R 5201)、比表面積試験 (JIS R 5201) および SEM 画像による観察と、SEM 画像の二値化 (走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて撮影したセメントペースト硬化体の反射電子像 (BEI) に基づく画像解析手法) による未水和セメントの定量を行った。

### b) 粉砕シリーズ

粉砕シリーズでは、DSP の密度試験 (JIS R 5201)、比表面積試験 (JIS R 5201) およびレーザー回折による粒度分布の測定を行った。

### c) 分級および粉砕した DSP を用いたモルタル実験

#### i) 使用材料および配合

使用材料を表 3.3 に示す。分級・粉砕した各 DSP を用いたモルタルに関し、フレッシュおよび強度発現性の試験を行った。モルタルの配合条件は、水結合材比 (W/DSP) = 50%、細骨材結合材比 (S/DSP) = 3.0 である。細骨材はセメント協会標準砂を用いた。なお、DSP は分級したものと粉砕したものを複数用い、評価試験を行った。

#### ii) 練混ぜ方法

練混ぜ方法は、セメントの物理試験方法 (JIS R 5201) の強さ試験に準拠して行った。

#### iii) フレッシュおよび硬化性状

モルタルのフレッシュ性状に関する試験として、フロー試験 (JIS R 5201) および空気量 (JIS A 1128) をそれぞれ練混ぜ直後で実施した。なお、フロー値は 160±30mm 程度とし、この範囲となるように SP 添加率を定めた。また空気量は 6.5±1.5% とした。硬化性状に関する試験は、材齢 7 日、28 日について圧縮強度試験 (JIS R 5201) を行った。供試体は 4×4×16cm の角柱供試体を作製し、打込み直後から 20±2℃ の恒温室で翌日まで封かん養生とし、脱型した。その後、試験材齢まで 20±1℃ の水中養生を行った。

表 3.3 使用材料

シリーズ	項目	記号	材料名	密度 g/cm <sup>3</sup>	比表面積 cm <sup>2</sup> /g	
分級	結合材	DSP-L①	低ブレン品(分級前:通常品)	3.05	4800	
		DSP-L(pass)	100 μm以下の低ブレン品(分級後)	3.04	5120	
		DSP-L(on)	100 μm超の低ブレン品(分級後)	2.98	890	
		DSP-H	高ブレン品(分級前:通常品)	2.49	9880	
		DSP-H(pass)	100 μm以下の高ブレン品(分級後)	2.50	9810	
		DSP-H(on)	100 μm超の高ブレン品(分級後)	2.78	2770	
粉砕		DSP-L②	低ブレン品(通常品)	2.78	5810	
		DSP-M	中ブレン品(粉砕前:通常品)	2.68	8520	
		DSP-M(BM)	ボールミルで粉砕した中ブレン品	2.72	9610	
		DSP-M(JM)	ジェットミルで粉砕した中ブレン品	2.71	11410	
分級・粉砕 共通		細骨材	N	普通ポルトランドセメント	3.16	3250
			S1	セメント協会標準砂	2.65	-
	SP		高性能AE減水剤	-	-	
	DE		消泡剤	-	-	

### (3) 実験結果および考察

#### a) 分級シリーズ

##### i) 物理試験結果

DSP の分級前と分級後の物理試験結果を表 3.4 に示す。表より、分級後の 100 $\mu\text{m}$  以下品は、分級前の通常品と同程度の密度、比表面積となったが、100 $\mu\text{m}$  超品は、比表面積が小さくなった。また、100 $\mu\text{m}$  超に分級される量は、DSP-L では 33.4%、DSP-H では 49.0% であり、分級前の比表面積が大きい DSP は 100 $\mu\text{m}$  超の粒子が多くなった。これは、DSP の比表面積が大きいほど、水和生成物等が顆粒状に凝集したものが多く含まれているためであると考えられる。

表 3.4 物理試験結果

DSPの種類	試験項目	分級前	分級後	
		通常品	100 $\mu\text{m}$ 超 (on)	100 $\mu\text{m}$ 以下 (pass)
低ブレン品 (DSP-L)	密度 $\text{cm}^3/\text{g}$	3.05	2.98	3.04
	比表面積 $\text{cm}^2/\text{g}$	4800	890	5120
	割合 %	100.0	33.4	66.6
高ブレン品 (DSP-H)	密度 $\text{cm}^3/\text{g}$	2.49	2.78	2.50
	比表面積 $\text{cm}^2/\text{g}$	9880	2770	9810
	割合 %	100.0	49.0	51.0

##### ii) SEM 画像

DSP の分級前と分級後の SEM 画像を写真 3.1~3.6 に示す。写真 3.1 と写真 3.4 より、DSP の比表面積が大きくなるほど、粒子が大きくなっていることが観察された。また分級後の 100 $\mu\text{m}$ (on)品は、水和生成物等が凝集したものがほとんどであり、さらに倍率を上げて観察すると、凝集したものの中にも未水和セメントが含まれていることが確認された（写真 3.2, 写真 3.5）。そのため、100 $\mu\text{m}$ (on)品を粉砕することで観察される未水和セメント量が多くなることを期待した。

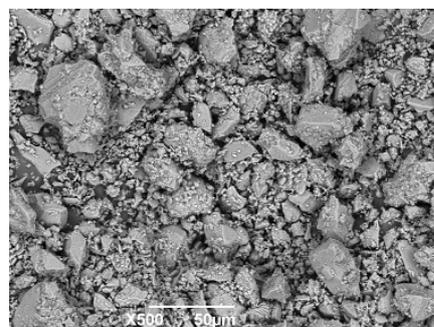
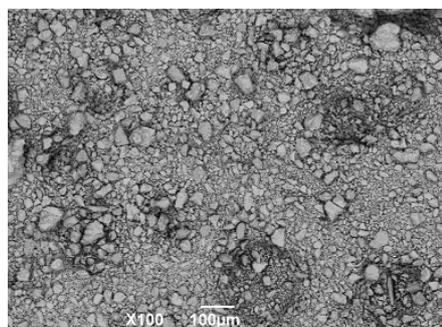


写真 3.1 DSP-L (分級前：通常品)

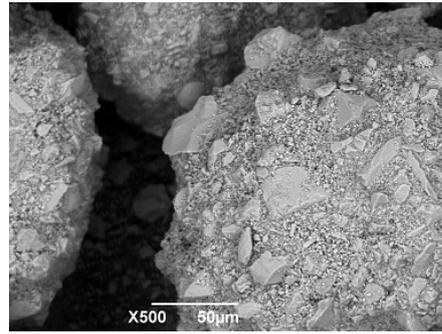
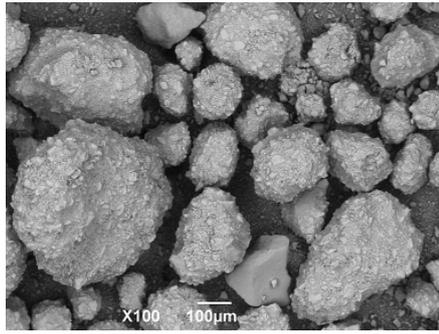


写真 3.2 DSP-L (分級後 : 100  $\mu$ m 超)

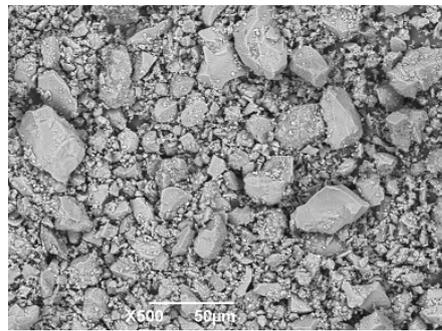
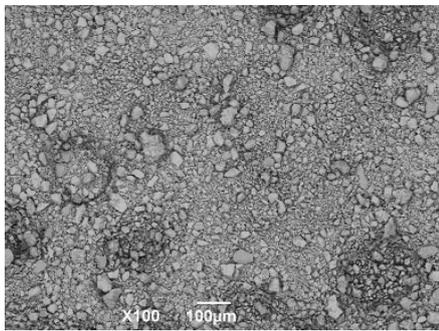


写真 3.3 DSP-L (分級後 : 100  $\mu$ m 以下)

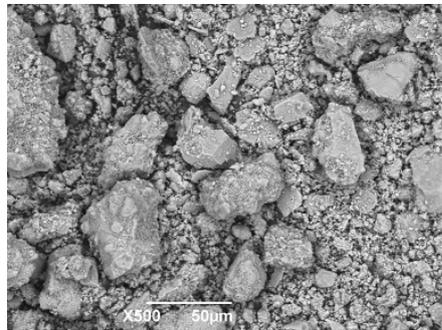
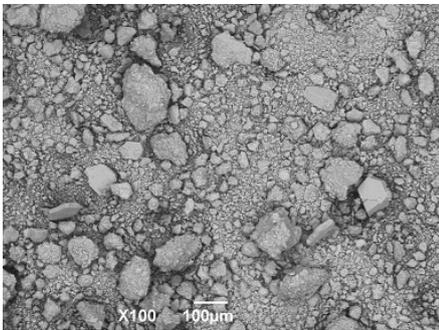


写真 3.4 DSP-H (分級前 : 通常品)

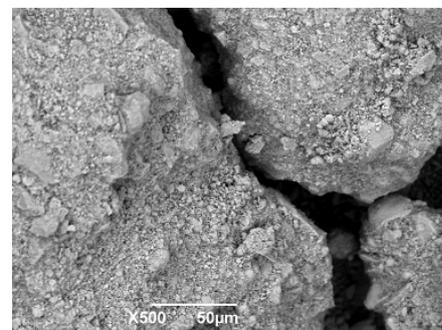
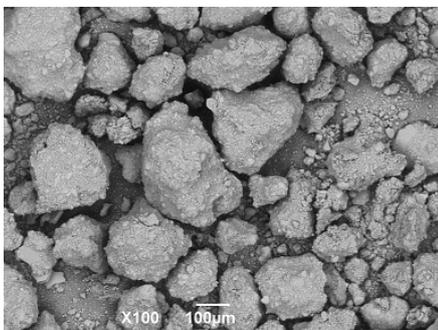


写真 3.5 DSP-H (分級後 : 100  $\mu$ m 超)

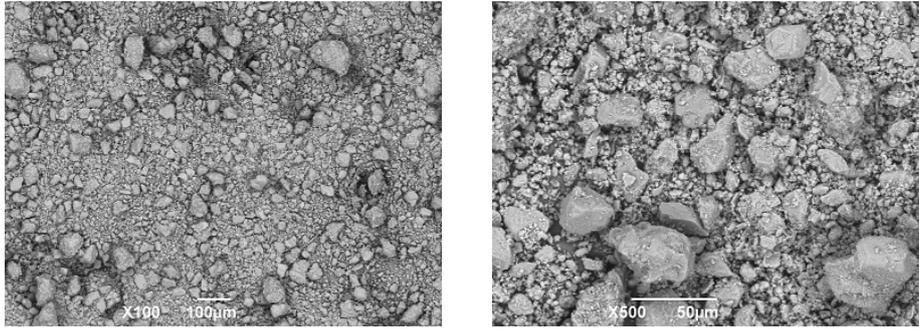


写真 3.6 DSP-H (分級後 : 100  $\mu$ m 以下)

### iii) 未水和セメント量

SEM 画像の二値化による未水和セメント量を図 3.16 に示す。図より DSP の比表面積が大きくなるほど、未水和セメント量は小さくなった。また分級前と分級後で未水和セメント量に大きな差は見られず、期待とは異なる結果となった。

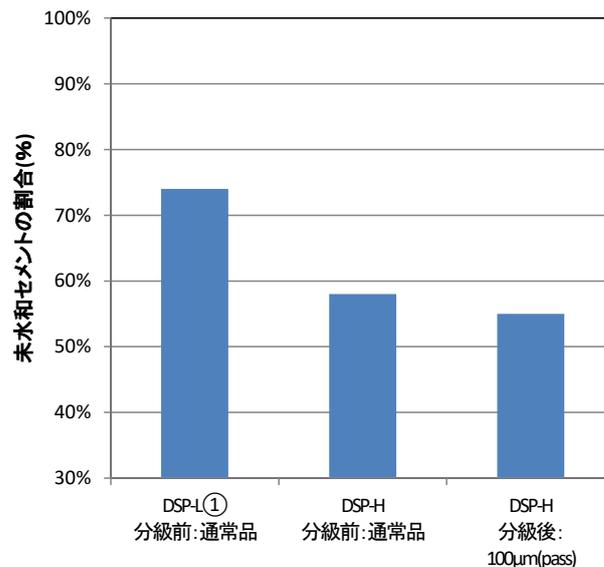


図 3.16 分級した DSP の未水和セメント量

### iv) モルタル実験結果 (分級)

モルタルのフレッシュ試験結果を表 3.5 に示す。表より、No.3, No.6 (100 $\mu$ m(on)) 配合は No.1, No.4 (通常品) 配合よりも同程度のフロー値を得るための SP 添加率が大きくなる傾向となった。これは、100 $\mu$ m (on) 品は、水和生成物等の凝集したものが多いため、SP 添加率が大きくなったためだと考えられる。それ以外の配合については、ほとんど差は見られなかった。

表 3.5 モルタルのフレッシュ試験結果（分級）

No	配合	SP (C×wt%)	DE (C×wt%)	フロー値 (mm)	空気量 (%)
1	DSP-L①(分級前:通常品)配合	0.4	2.4	150 × 147	6.7
2	DSP-L(分級後:100 μm(pass))配合	0.6	2.7	167 × 162	6.3
3	DSP-L(分級後:100 μm(on))配合	1.2	2.2	155 × 151	6.7
4	DSP-H(分級前:通常品)配合	4.8	1.2	160 × 160	7.8
5	DSP-H(分級後:100 μm(pass))配合	4.0	1.5	131 × 129	7.4
6	DSP-H(分級後:100 μm(on))配合	5.6	1.2	190 × 182	6.4
7	N配合	-	-	170 × 168	6.5

モルタルの圧縮強度試験結果を図 3.17 に示す。図より、分級前と分級後で圧縮強度には差が見られなかった。これは前記の未水和セメント量の結果とほぼ同様の傾向である。

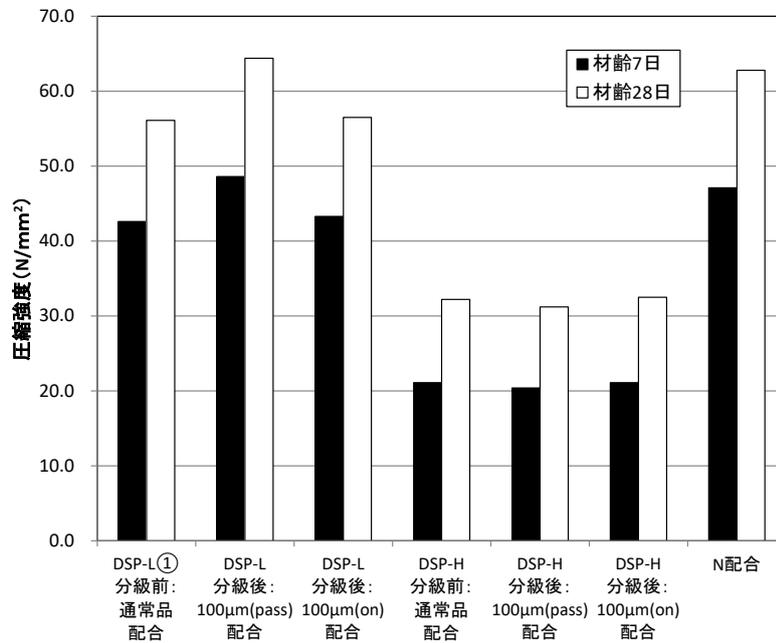


図 3.17 モルタルの圧縮強度試験結果（分級）

b) 粉砕シリーズ

i) 物理試験結果

粉砕後の DSP の物理試験結果を表 3.6 に示す。表より、粉砕の前後で密度が若干大きくなり、比表面積が大きくなった。これは水和生成物等が粉砕された影響と考えられる。

表 3.6 粉砕した DSP の物理試験結果

DSPの種類	試験項目	粉砕前	粉砕後	
		通常品	ボールミル	ジェットミル
中ブレン品 (DSP-M)	密度 cm <sup>3</sup> /g	2.68	2.72	2.71
	比表面積 cm <sup>2</sup> /g	8520	9610	11410

## ii) 粒度分布試験

レーザー回折による粒度分布試験結果を図 3.18 に示す。図よりボールミルを用いた場合、粉砕前の DSP は粒径 100~1000 $\mu\text{m}$  に粒子が存在しているが、粉砕後の DSP では粒径 100 $\mu\text{m}$  超の粒子が残っているものの、大部分が粉砕できており、100 $\mu\text{m}$  以下の粒子は増加している。また、ジェットミルを用いた場合、100 $\mu\text{m}$  超の粒子は残留せず、100 $\mu\text{m}$  以下の粒子が大幅に多くなり、ピークの粒径は、N の粒子より小さくなり、比表面積の結果と合致する傾向となった。これにより、粉砕機の種類により粒度分布が異なることが確認された。

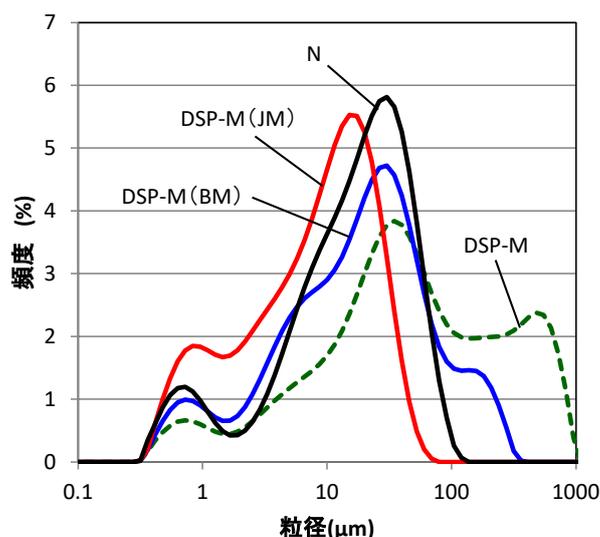


図 3.18 粉砕した DSP の粒度分布

## iii) モルタル実験結果（粉砕）

モルタルのフレッシュ試験結果一覧表を表 3.7 に示す。表より、粉砕前に比べ、粉砕後のボールミルおよびジェットミルともに SP 添加率は大幅に小さくなった。これは、粉砕により DSP に含まれる顆粒状の水和生成物等および未水和粒子（写真 3.1, 3.2, 3.4, 3.5）が粉砕されたことによる影響と考えられるが、これについては今後検討が必要である。またボールミルとジェットミルでは、ボールミルの方が SP 添加率は若干小さくなった。これは、ジェットミルの場合、粒子が N よりもさらに細かくなっているため、微粉効果により SP 添加率が大きくなったためであると考えられる。

表 3.7 モルタルのフレッシュ試験結果一覧表（粉砕）

No	配合	SP (C×wt%)	DE (C×wt%)	フロー値 (mm)	空気量 (%)
1	DSP-L②(粉砕前:通常品)	2.7	2.2	148 × 144	6.4
2	DSP-M(粉砕前:通常品)	4.8	2.2	169 × 161	4.8
3	DSP-M(粉砕後:ボールミル)	1.4	2.3	148 × 147	7.1
4	DSP-M(粉砕後:ジェットミル)	1.8	2.4	146 × 145	7.1

モルタルの圧縮強度試験結果を図 3.19 に示す。空気量の影響も考えられるが、ボールミルおよびジェットミルで粉砕することにより、若干強度が低下した。これは、水和生成物等が凝集したもののなかに含まれる未水和セメントに期待したが、結果的にその効果が見られなかった。

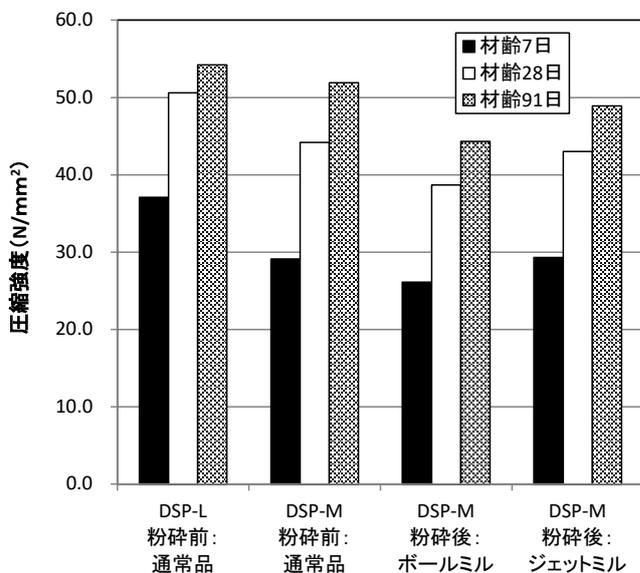


図 3.19 モルタルの圧縮強度試験結果 (粉砕)

### 3.5 DSP の品質管理手法に関する研究

#### 3.5.1 実機プラントによる DSP 製造実験概要

本実機試験は生コンプラントで生コン 5m<sup>3</sup>を製造し、戻りコンが発生し、処理するまでの時間を 2.5 時間と設定した。2.5 時間経過後、骨材を分級し残ったスラッジ水を水槽で貯留する時間を変化させ、DSP を製造した。また夏季において各種遅延剤の効果を検証するため、遅延剤の添加時期を練混ぜから 1.5 時間後に添加し、製造した DSP の物性試験(密度・

表 3.8 使用材料

項目	記号	材料	密度	吸水率
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント	3.15	-
細骨材	S1	石灰砕砂	2.67	0.93
	S2	陸砂	2.57	1.22
粗骨材	G	石灰碎石	2.70	0.44
混和剤	AE	AE減水剤		-
	SP	高性能AE減水剤		ポリカルボン酸系化合物
遅延剤	GN	グルコン酸ナトリウム		水溶液濃度:40%
	S	シヨ糖		水溶液濃度:68%
	DE①	デキストリン(分子量:10000)		水溶液濃度:35%
	DE②	デキストリン(分子量:4100)		水溶液濃度:35%

比表面積・強熱減量)とモルタルによるフレッシュおよび圧縮強度試験を行った。使用材料を表 3.8 に、実機試験で使用した生コンクリートの配合表を表 3.9 に、実機プラントによる実験水準を表 3.10 に示す。

表 3.9 配合表

記号	W/C %	s/a %	単体量(kg/m <sup>3</sup> )						
			W	OPC	S1	S2	G	AE	SP
50-OPC-AE	50	44.4	185	370	418	342	980	4.81	-
50-OPC-SP	50	47.9	170	340	467	382	953	-	3.57

表 3.10 実機プラントによる実験水準および DSP 物性試験結果一覧表

実施 季節	配合 (記号)	練混ぜからDSP製造までの経過時間 ①													遅延剤			外気温 ℃ ②	積算温 度①× ②	DSP物性試験結果				
		1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	21h	51h	種類	添加量 (G×wt%)	添加時期	密度 g/cm <sup>3</sup>			比表面積 cm <sup>2</sup> /g	強熱 減量 %			
夏季	50-OPC-AE																無し			27.0	67.5	2.91	5960	12.25
	50-OPC-AE																無し			31.0	108.5	2.82	7150	14.54
	50-OPC-SP																無し			30.0	75.0	2.87	5620	13.46
	50-OPC-AE		⊗														GN	0.10%	1.5h	31.0	77.5	2.95	5260	11.16
	50-OPC-AE																無し			33.0	148.5	2.84	6620	13.71
	50-OPC-AE		⊗														GN	0.10%	1.5h	32.0	144.0	2.83	6720	12.60
	50-OPC-AE																無し			31.0	77.5	2.89	6340	12.10
	50-OPC-AE																無し			31.0	201.5	2.69	9280	15.80
	50-OPC-AE																無し			32.0	672.0	2.45	11030	21.65
	50-OPC-AE																無し			23.0	57.5	2.95	5630	8.91
	50-OPC-AE		⊗														S	0.20%	1.5h	25.0	62.5	3.03	5060	8.01
	50-OPC-AE		⊗														DE①	0.50%	1.5h	26.0	65.0	3.04	4190	7.66
	50-OPC-AE		⊗														DE②	0.50%	1.5h	26.0	65.0	3.07	4790	7.63
	50-OPC-AE																無し			28.0	70.0	2.91	6030	10.42
	50-OPC-AE																無し			28.0	126.0	2.87	8270	12.15
	50-OPC-AE		⊗														GN	0.10%	1.5h	28.0	126.0	2.93	6230	10.96
	50-OPC-AE		⊗														GN	0.40%	1.5h	28.0	126.0	2.98	5390	9.64
	冬季	50-OPC-AE																無し			8.3	20.8	3.00	5480
50-OPC-AE																	無し			8.3	54.0	2.92	7700	11.65
50-OPC-AE																	無し			8.3	78.9	2.83	9040	12.95
50-OPC-AE																	無し			8.3	419.2	2.44	9320	18.43

### 3.5.2 実験方法

本実験では実機プラントにより製造した DSP の密度試験(JIS R 5201)、比表面積試験(JIS R 5201)および強熱減量試験(JIS R 5202)を行った。またモルタルはホバート型モルタルミキサーを用いて練混ぜを行った。フレッシュ試験では、モルタルフロー(目標値 170±30 mm)、空気量(目標値 6.5±2.0%)の各試験を目標値となるよう混和剤で調整し実施した。圧縮強度試験では、DSP を用いモルタル供試体(4×4×16cm)を作製し、その圧縮強度から DSP の強度発現性を評価した。モルタルの配合条件は、水結合材比(W/DSP)=50%、細骨材結合材比(S/DSP)=3.0 とした。細骨材はセメント協会標準砂を用い、養生条件は標準養生とした。その後材齢 7、28 日で圧縮強度試験を行った。

### 3.5.3 実験結果および考察

#### (1) DSP の物性試験結果

DSP の物性試験結果一覧表を表 3.10 に示す。表より夏季および冬季において、積算温度が小さいほど DSP の密度は大きく、比表面積および強熱減量は小さくなった。積算温度と DSP の比表面積の関係を図 3.20 に示す。図より積算温度と DSP の比表面積には夏季および冬季において、おおむね相関関係が見られた。また夏季に遅延剤を添加することにより、同一積算温度で DSP の比表面積が小さくなった。このことから、DSP の品質管理はこの積算温度と比表面積で行うことができ、さらに夏季に遅延剤を添加することは DSP の品質を確保するうえで有効な方法であると考えられる。

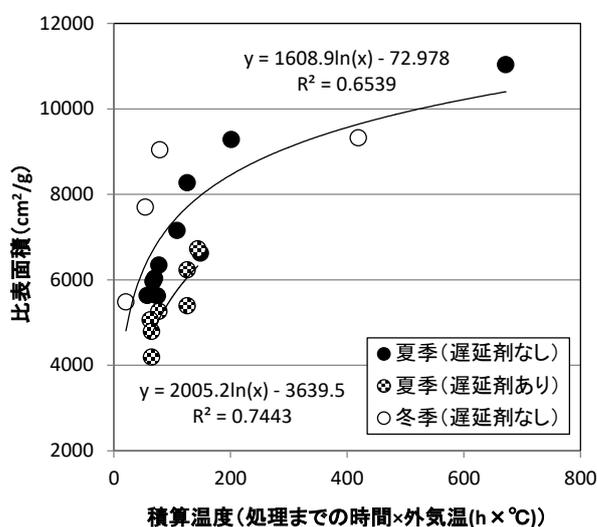


図 3.20 積算温度と DSP の比表面積

#### (2) DSP の粒度分布

比表面積の異なる DSP (3 種類)、OPC および H のレーザー回折式粒度分布測定結果を図 3.21 に示す。図の凡例にあるカッコ内の数字は比表面積の値を示す。図より DSP の比表面積が大きくなるに従い、30 $\mu$ m 程度の頻度は低下し、300 $\mu$ m 程度の頻度は増大する結果となり、図 3.3 と同様の結果となった。また遅延剤を用いたものは 300 $\mu$ m 程度の頻度がさらに小さくなった。これは 300 $\mu$ m に含まれるセメント粒子の凝集したものが遅延剤を用いることにより少なくなったものと考えられる。

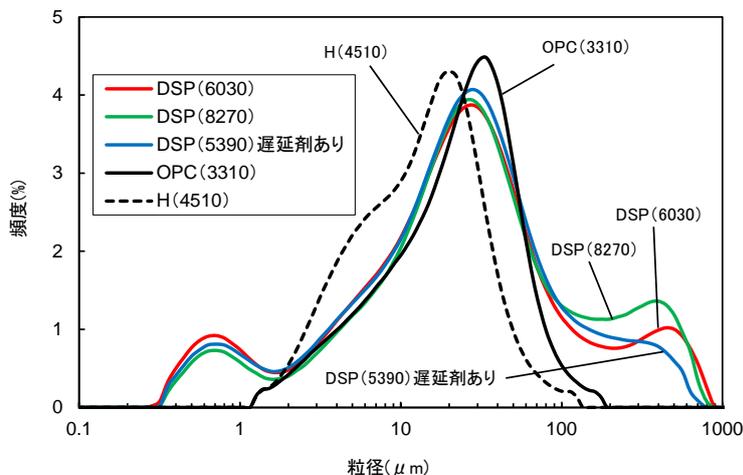


図 3.21 粒度分布測定（実機試験サンプル）

### (3) モルタルの試験結果

DSP の比表面積と高性能 AE 減水剤（以下、SP と称す）添加率の関係を図 3.22 に示す。図より DSP の製造時期によらず比表面積が小さいほど、SP 添加率は小さくなった。これは、DSP に含まれるセメント粒子の凝集したものが影響しているものと考えられる。

モルタルの圧縮強度試験結果について、DSP の比表面積と材齢 28 日のモルタル圧縮強度の関係を図 3.23 に示す。図より DSP は OPC との強度比で 0.3~0.9 程度となった。また夏季および冬季において DSP の比表面積が小さいほど、強度が大きくなり、夏季に戻りコンへ遅延剤を用いることにより、強度が大きくなった。

以上より DSP の品質管理手法は積算温度と比表面積で管理できることを新たに見出した。

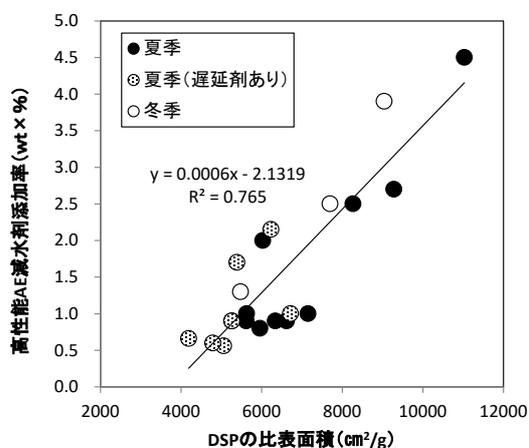


図 3.22 DSP の比表面積と混和剤添加率

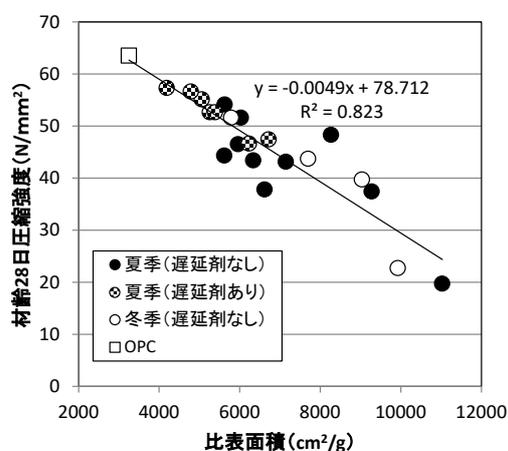


図 3.23 DSP の比表面積とモルタル強度

### 3.6 まとめ

本章の検討で得られた結論を以下に示す。

- (1) DSP の密度，強熱減量および比表面積と平均外気温には高い相関関係が認められた。
- (2) DSP の粒度分布は，30 $\mu\text{m}$  程度のピークの他に 300 $\mu\text{m}$  程度の頻度も高く 2 山状の粒度分布であることが確認された。
- (3) DSP の SEM 画像では，未水和セメント，細骨材の微粒分の一部および水和生成物の凝集したものが含まれていることが観察された。
- (4) DSP の未水和セメントの割合は 0.6~0.8 であり，DSP の比表面積が大きくなるに従い未水和セメント量が減少する傾向が認められた。
- (5) DSP に含まれる微砂分量は ZKT 法で 5~10%程度，グルコン酸法では，20~40%程度であった。
- (6) DSP の六価クロム溶出量は，OPC や BB と比べ大幅に小さい値となった。
- (7) 遅延剤を用いた DSP の品質向上手法においては，強度発現性，水和発熱特性および凝結特性の全てにおいて遅延剤添加による品質向上効果が確認された。
- (8) 100 $\mu\text{m}$  で分級した DSP は，100 $\mu\text{m}$  超の粒子に水和生成物等が凝集したものが多く含まれており，その凝集したのものにも未水和セメントが含まれていることが観察された。
- (9) 分級した DSP を用いたモルタルのフレッシュ性状は，100 $\mu\text{m}$  超のものが同一程度のフレッシュ性状を得るのに必要な SP 添加率が大きくなり，100 $\mu\text{m}$  以下は分級前と同程度であった。また，モルタルの圧縮強度は，ほぼ同程度であった。
- (10) 粉砕した DSP を用いたモルタルのフレッシュ性状は，粉砕前に比べ，同一程度のフレッシュ性状を得るのに必要な SP 添加率は小さくなった。また，モルタルの圧縮強度は若干の低下が見られた。
- (11) 実機プラントによる DSP の製造実験では，積算温度と DSP の比表面積には夏季および冬季において，おおむね相関関係が見られた。また夏季に遅延剤を添加することにより，同一積算温度で DSP の比表面積が小さくなった。このことから，DSP の品質管理はこの積算温度と比表面積で行うことができることを新たに見出した。

### 参考文献

- 1) 一般財団法人日本規格協会：JIS ハンドブック 10 生コンクリート，pp.1830-1832，2017.6
- 2) 社団法人日本非破壊検査協会：グルコン酸ナトリウムによる硬化コンクリートの単位セメント量試験方法（NDIS 3422），pp.1-13，2002.8
- 3) 佐川孝広，名和豊春：高炉セメントの水和反応に及ぼす水セメント比の影響，セメント・

- コンクリート論文集, No.60, pp.82-88, 2006
- 4) 社団法人土木学会：コンクリートからの微量成分溶出に関する現状と課題, pp.25-29, 2003
  - 5) 荒井康夫：セメントの材料化学, 大日本図書, 1991, pp.120-159

# 第4章

---

## DSP を用いたクリンカーフリーコンクリート

## 第4章 DSP を用いたクリンカーフリーコンクリート

### 4.1 はじめに

本章では、DSP を用いたクリンカーフリーコンクリート（以下、RCCF コンクリートと称す）について検討した。このコンクリートは OPC をほとんど用いず、DSP と副産物混和材を結合材としたコンクリートである。ここでは設計基準強度  $24\text{N/mm}^2$  以上のプレキャスト製造による RCCF コンクリートを実現する可能性を明らかにすること目的として、その基礎物性や耐久性に着目し、中性化抵抗性および収縮ひび割れ抵抗性について検討した。

### 4.2 DSP を用いたクリンカーフリーコンクリートの基礎物性

#### 4.2.1 DSP と高炉スラグ微粉末

##### (1) 実験の目的

ここでは、DSP の種類および BFS の混合割合の影響を明らかにすることを目的とし、DSP と BFS を用いたモルタルのフレッシュおよび硬化性状について検討した。

##### (2) 実験概要

###### a) 使用材料および調合

使用材料を表 4.1 に、モルタルの配合を表 4.2 に示す。セメントは N，BFS は高炉スラグ微粉末 4000 を使用し、DSP は比表面積  $6070\text{cm}^2/\text{g}$ (低ブレン品(記号：DSP-L))のものおよび比表面積  $11260\text{cm}^2/\text{g}$ (高ブレン品(記号：DSP-H))の 2 種類を使用した。なお、DSP-L はこれまでの検討により未水和セメントの残存量が多く、DSP-H は未水和セメントの残存量が少ない。モルタルの配合は、 $W/B=30, 40, 50\%$ とし、比較対象の N の場合のみ  $60\%$ についても実施した。DSP 置換率は、 $B \times 30\%$ と  $60\%$ の 2 水準とした。

表 4.1 使用材料

項目	記号	材料名	密度 $\text{g/cm}^3$	比表面積 $\text{cm}^2/\text{g}$
結合材	N	普通ポルトランドセメント	3.16	3310
	DSP-L	低ブレン品乾燥スラッジ微粉末	2.82	6070
	DSP-H	高ブレン品乾燥スラッジ微粉末	2.45	11260
	BFS	高炉スラグ微粉末4000	2.91	4310
細骨材	S1	大船渡産石灰砕砂	2.67	-
	S2	富津産山砂	2.58	-
混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能減水剤	-	-
	AE	AE剤	-	-
	DF	空気量調整剤(消泡剤)	-	-

表 4.2 モルタル調合表

No	記号	W/B (%)	DSP 置換率	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
				水	結合材 (B)				細骨材	
					W	N	BFS	DSP-L	DSP-H	S1
1	30-BFS40-DSP-L60	30	B × 60%	255	-	340	510	-	581	476
2	30-BFS40-DSP-H60		B × 60%	255	-	340	-	510	542	444
3	30-BFS70-DSP-L30		B × 30%	255	-	595	255	-	587	481
4	30-N100		-	255	850	-	-	-	623	510
5	40-BFS40-DSP-L60	40	B × 60%	240	-	240	360	-	730	598
6	40-BFS40-DSP-H60		B × 60%	240	-	240	-	360	703	575
7	40-BFS70-DSP-L30		B × 30%	240	-	420	180	-	733	600
8	40-N100		-	240	600	-	-	-	759	621
9	50-BFS40-DSP-L60	50	B × 60%	225	-	180	270	-	827	677
10	50-BFS40-DSP-H60		B × 60%	225	-	180	-	270	807	660
11	50-BFS70-DSP-L30		B × 30%	225	-	315	135	-	830	679
12	50-N100		-	225	450	-	-	-	850	696
13	60-N100	60	-	225	375	-	-	-	884	723

表 4.3 フレッシュ試験結果一覧表

No	記号	W/B (%)	DSP 置換率	混和剤添加率 (B × %)			モルタルフロー (mm)		空気量 (%)
				SP	AE	DF	0打	15打	
1	30-BFS40-DSP-L60	30	B × 60%	1.60%	-	0.40%	101	129	4.6
2	30-BFS40-DSP-H60		B × 60%	4.70%	-	0.30%	152	166	5.0
3	30-BFS70-DSP-L30		B × 30%	0.65%	-	0.20%	108	151	4.3
4	30-N100		-	0.45%	0.05%	-	114	173	4.9
5	40-BFS40-DSP-L60	40	B × 60%	1.40%	-	0.20%	110	158	3.7
6	40-BFS40-DSP-H60		B × 60%	3.40%	-	0.15%	164	180	5.6
7	40-BFS70-DSP-L30		B × 30%	0.55%	-	0.15%	109	168	4.5
8	40-N100		-	0.30%	0.03%	-	108	164	5.1
9	50-BFS40-DSP-L60	50	B × 60%	0.95%	-	0.25%	101	137	5.2
10	50-BFS40-DSP-H60		B × 60%	3.20%	-	0.75%	106	135	4.9
11	50-BFS70-DSP-L30		B × 30%	0.50%	-	0.75%	104	157	5.0
12	50-N100		-	0.25%	0.20%	0.75%	104	148	5.5
13	60-N100	60	-	0.30%	0.05%	0.75%	102	145	5.1

b) 練混ぜ方法

モルタルの練混ぜは、ホバート型モルタルミキサー(公称容量 8L)を使用し、結合材と細骨材を投入し、空練り 30 秒行った後、水と混和剤を投入して練混ぜた。練混ぜ時間に関しては、適切な練混ぜ時間(モルタルの流動性が安定する最短時間)が結合材の種類や量によって異なるため、各調合の所要の練混ぜ時間についても検討した。

c) フレッシュおよび硬化性状

モルタルのフレッシュ性状に関する試験として、モルタルフロー試験(JIS R 5201)および空気量試験(JIS R 1128)をそれぞれ練混ぜ直後で実施した。なお、フロー値は 150 ± 30mm 程度とし、この範囲となるように SP 添加率を定めた。また、空気量は 4.5 ± 1.5% とした。硬化性状に関する試験は、材齢 3 日、28 日および 91 日について圧縮強度試験(JIS A 1108)を行った。供試体は φ50 × 100mm の円柱供試体を作製し、打込み直後から 20 ± 2°C の恒温室で材齢 3 日まで封かん養生とし、脱型した。その後、試験材齢 3 日の供試体について強度試

験を実施し、残りの試験材齢のものについては、 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ の水中養生を行った。促進中性化試験(JIS A 1153 準拠)は、上記圧縮試験用供試体の作製条件と同様とした $\phi 50\times 100\text{mm}$ の円柱供試体を4体作成し、材齢28日まで水中養生した。その後 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60\pm 5\%$ 、 $\text{CO}_2$ 濃度5%の促進中性化槽に静置し、促進期間7日、28日、91日、182日で2面ずつ試験体をカットし、断面の中性化深さを測定した。自由収縮試験は、 $\phi 100\times 200\text{mm}$ の円柱供試体を2体作製し、内部に埋込みひずみゲージを配し、材齢7日まで $20^{\circ}\text{C}$ 封かん養生した。材齢7日で脱型後、 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60\pm 5\%$ の条件で、乾燥材齢182日まで長さ変化の測定を行った。

### (3) 実験結果および考察

#### a) フレッシュ性状

表4.3はフレッシュ試験結果一覧表を、図4.1は各調合のSP添加率と練混ぜ時間の関係を示したものである。表および図より、練混ぜ直後のフロー値を $150\pm 30\text{mm}$ とした場合、SP添加率を0.25~4.70(B×%)の範囲となった。DSP-Hを使用した調合は、SP添加率が大きくなり、練混ぜ時間が長くなった。またDSP置換率を大きくすると、SP添加率が大きくなり、普通モルタルに比べ、DSPと副産物混和材を併用したモルタル(以下、RCCFモルタルと称す)はSP添加率が大きくなった。空気量は、AE剤の添加率を0.00~0.20(B×%)の範囲において、全ての調合で同程度となり、調合による差はほとんど見られなかった。

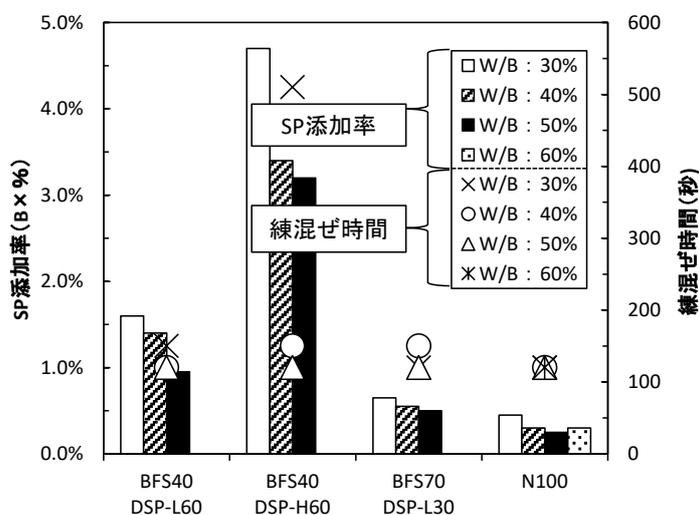


図 4.1 各調合の SP 添加率と練混ぜ時間

#### b) 硬化性状

図4.2はモルタルの圧縮強度試験結果である。RCCFモルタルの強度は初期材齢では、普通モルタルに比べ全てのW/Bにおいて大幅に小さいが、長期材齢では同程度またはそれ以上の強度となった。この傾向はW/Bが小さい場合ほど明確にあらわれている。またDSP置換率を大きくすると、強度が大きくなり、DSPの種類の影響では、DSP-Lを用いた調合の方が強度が大きくなった。

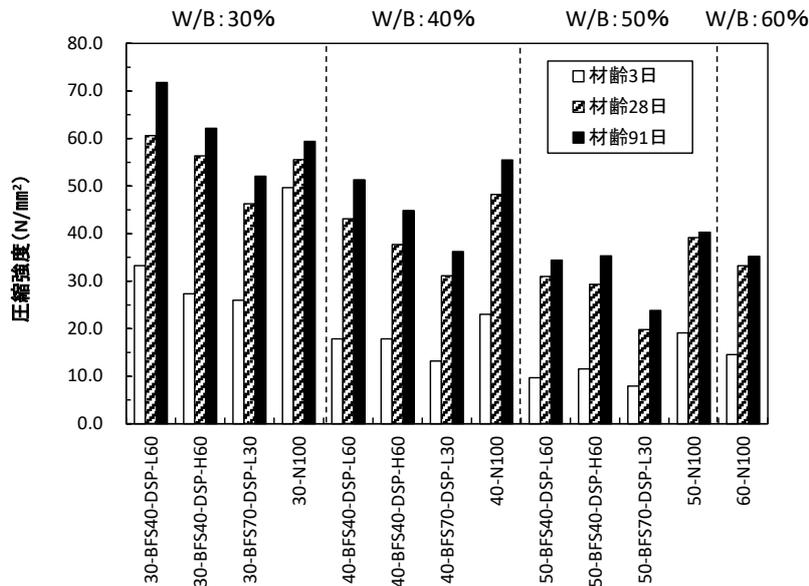


図 4.2 圧縮強度試験結果

図 4.3～4.5 は図 4.2 の結果を B/W と圧縮強度の関係で材齢ごとに示したものである。いずれの調合および材齢においても B/W の増加に伴い、強度は大きくなっているが、材齢 3 日では、普通モルタルの傾きが大きく、材齢 28 日、91 日においては、逆に RCCF モルタルの傾きの方が大きくなっている。また、DSP 置換率に関し、置換率 60% が 30% に比べ、各材齢において傾きが大きくなった。DSP の種類の影響では、DSP-L が DSP-H よりも各材齢で傾きは大きくなった。これらの傾きの変化は、普通モルタルに比べ、RCCF モルタルは長期材齢における副産物混和材の潜在水硬性等により、組織が緻密化したためであると考えられる。

図 4.6～4.8 は、各 W/B ごとの自由収縮試験結果である。図より、全ての W/B において、普通モルタルより RCCF モルタルの方が収縮量が大きくなった。DSP の種類の影響は、DSP-L を用いた場合収縮量が小さくなり、また DSP 置換率が小さいほど、収縮量が大きく

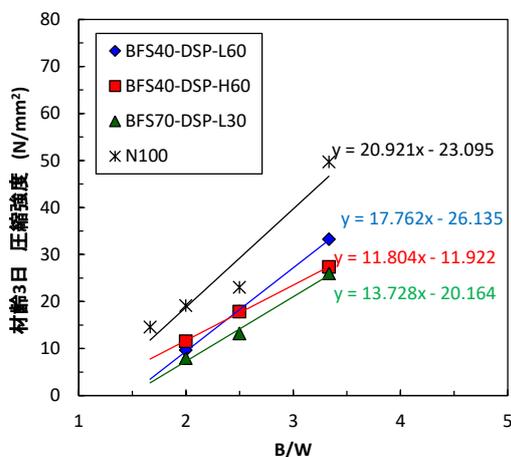


図 4.3 B/W と圧縮強度 (材齢 3 日)

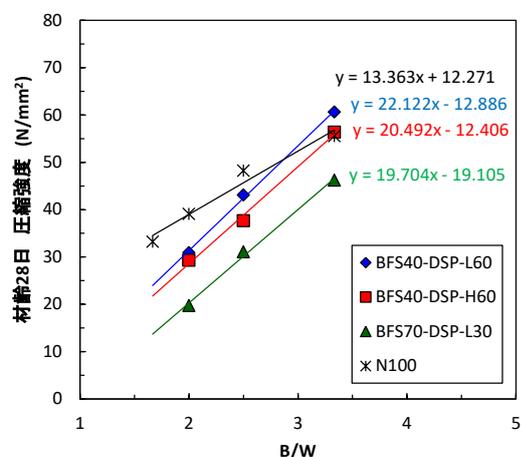


図 4.4 B/W と圧縮強度 (材齢 28 日)

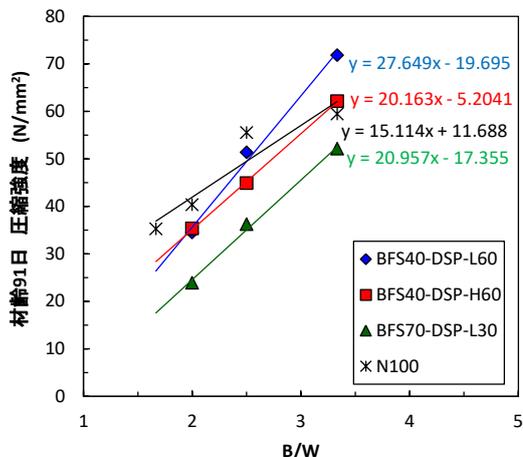


図 4.5 B/Wと圧縮強度（材齢 91 日）

なった。これらは各モルタルの圧縮強度および結合材容積の差による影響と考えられ、今後さらなる検討が必要である。

図 4.9 はモルタルの材齢 28 日における圧縮強度と中性化速度係数の関係を示したものである。図より、RCCF モルタルは普通モルタルに比べ、中性化速度係数が大きくなっているが、強度レベルを高くすることにより、普通モルタルと同程度の中性化抵抗性が付与できることがわかった。また DSP 置換率を大きくし、DSP に DSP-L を用いた方が中性化速度係数は小さくなった。これらは、普通モルタルでは材齢が経過するに伴い生成する  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の量が増加するが、RCCF モルタルでは、材齢の経過に伴い  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の量は副産物混和材の潜在水硬性等により消費されることおよび圧縮強度に比例して、硬化体組織が緻密になること等が、二酸化炭素の拡散に影響しているためであると考えられる。

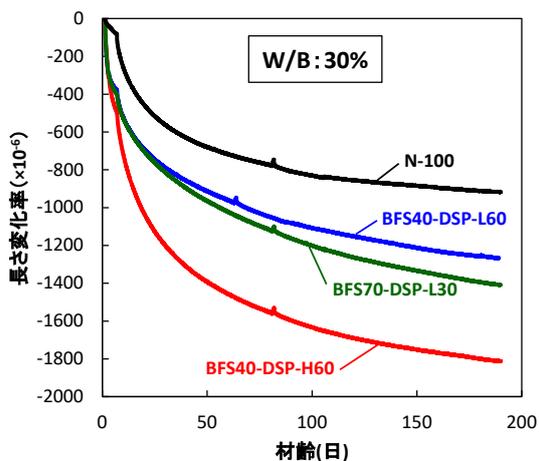


図 4.6 自由収縮試験結果 (W/B:30%)

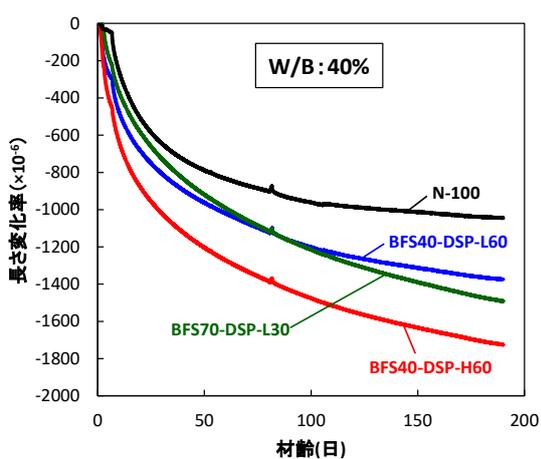


図 4.7 自由収縮試験結果 (W/B:40%)

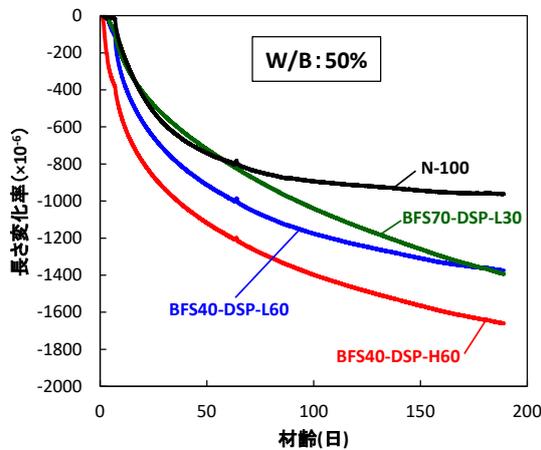


図 4.8 自由収縮試験結果 (W/B:50%)

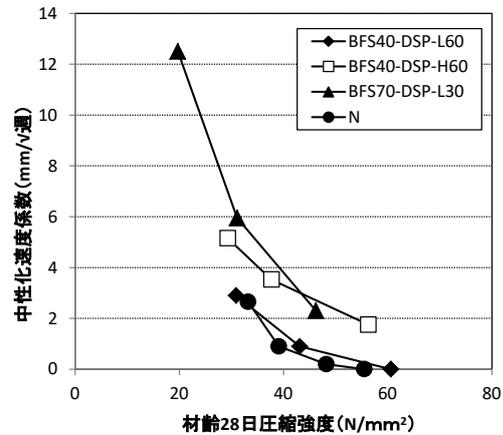


図 4.9 圧縮強度と中性化速度係数の関係

#### 4.2.2 DSP とフライアッシュ

##### (1) 実験の目的

ここでは、DSP の比表面積の影響と FA の混合割合および養生条件の影響を明らかにすることを目的とし、DSP と FA を用いたモルタルのフレッシュおよび硬化性状について検討した。

##### (2) 実験概要

###### a) 使用材料および調合

使用材料を表 4.4 に、調合を表 4.5 に示す。セメントは N，FA はフライアッシュ II 種を使用し、DSP は DSP-A～D までの比表面積が異なる 4 種類を使用した。モルタルの調合は、W/B=30, 40%とし、比較対象の N の場合のみ 60%についても実施した。DSP 置換率は、B×60%と 80%の 2 水準とした。

###### b) 養生条件

供試体の作製および各種試験は 4.2.1 と同様とし、ここでは、プレキャスト製造を想定し、配合 No.1, 2, 3, 4, 5, 8, 9(表 4.5 記載)について蒸気養生も行った。蒸気養生条件は練混ぜ終了から、2～6 時間の前養生を行い、20°C/h の勾配で昇温し、65°Cで 3.5 時間保持した後、20°C/h の勾配で降温した。

##### (3) 実験結果および考察

###### a) フレッシュ性状

モルタルのフレッシュ試験結果一覧表を表 4.6 に示す。図 4.10 は各調合における SP 添加率と練混ぜ時間の関係を示したものである。各表、図より、練混ぜ直後のフロー値を 150 ±30mm とした場合、SP 添加率は 0.30～8.50(B×%)の範囲となった。DSP の比表面積が大きくなるほど、SP 添加率、練混ぜ時間が大きくなっている。また DSP 置換率が高いほど、

SP 添加率が大きくなった。空気量は、AE 剤の添加率が 0.02~0.15(B×%)の範囲において、調合による差はほとんど見られなかった。

表 4.4 使用材料

項目	記号	材料名	密度 g/cm <sup>3</sup>	比表面積 cm <sup>2</sup> /g
結合材	N	普通ポルトランドセメント	3.16	3310
	DSP-A	乾燥スラッジ微粉末A	2.75	7200
	DSP-B	乾燥スラッジ微粉末B	2.45	8580
	DSP-C	乾燥スラッジ微粉末C	2.35	11640
	DSP-D	乾燥スラッジ微粉末D	2.08	13290
細骨材	FA	フライアッシュⅡ種	2.31	3880
	S1	大船渡産石灰砕砂	2.67	-
	S2	富津産山砂	2.58	-
混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能減水剤	-	-
	AE	AE剤	-	-
	DF	空気量調整剤(消泡剤)	-	-

表 4.5 モルタル調合表

No	記号	W/B (%)	DSP 置換率	単位量(kg/m <sup>3</sup> )									備考	
				結合材(B)								細骨材		
				水 W	N	DSP-A	DSP-B	DSP-C	DSP-D	FA	S1	S2		
1	30-FA40-DSP-A60	30	B×60%	255	-	510	-	-	-	340	532	436	蒸気養生	
2	30-FA20-DSP-A80		B×80%	255	-	680	-	-	-	170	548	449		
3	40-FA40-DSP-A60	40	B×60%	240	-	360	-	-	-	240	694	568		
4	40-FA20-DSP-A80		B×80%	240	-	480	-	-	-	120	706	577		
5	40-FA40-DSP-B60		B×60%	240	-	-	360	-	-	240	671	549		
6	40-FA40-DSP-C60		B×60%	240	-	-	-	360	-	240	662	542		
7	40-FA40-DSP-D60		B×60%	240	-	-	-	-	360	240	634	518		
8	40-N100	-	-	240	600	-	-	-	-	759	621	蒸気養生		
9	60-N100	60	-	225	375	-	-	-	-	884	723	蒸気養生		

表 4.6 フレッシュ試験結果一覧表

No	記号	W/B (%)	DSP 置換率	混和剤添加率 (B×%)			モルタルフロー (mm)		空気量 (%)
				SP	AE	DF	0打	15打	
				1	30-FA40-DSP-A60	30	B×60%	1.45%	
2	30-FA20-DSP-A80	B×80%	2.40%	0.02%	0.08%		107	127	4.7
3	40-FA40-DSP-A60	40	B×60%	1.20%	0.03%	0.15%	128	177	4.6
4	40-FA20-DSP-A80		B×80%	1.70%	0.03%	0.20%	105	133	5.2
5	40-FA40-DSP-B60		B×60%	2.50%	0.05%	0.15%	104	125	4.0
6	40-FA40-DSP-C60		B×60%	6.00%	0.15%	0.15%	140	153	4.8
7	40-FA40-DSP-D60		B×60%	8.50%	0.03%	0.15%	114	128	4.4
8	40-N100	-	-	0.30%	0.09%	-	114	180	5.5
9	60-N100	60	-	0.30%	0.06%	0.50%	105	147	4.8

#### b) 硬化性状

各調合におけるモルタルの圧縮強度試験の結果を図 4.11 に示す。図より、W/B 一定の場合、普通モルタルに比べ、RCCF モルタルは長期材齢においても強度が小さくなった。また DSP 置換率は大きいほど、強度が大きくなり、DSP 比表面積は大きいほど、強度が小さくなった。標準養生と蒸気養生においては、全ての調合で初期、長期材齢ともにほとんど差が見られなかった。

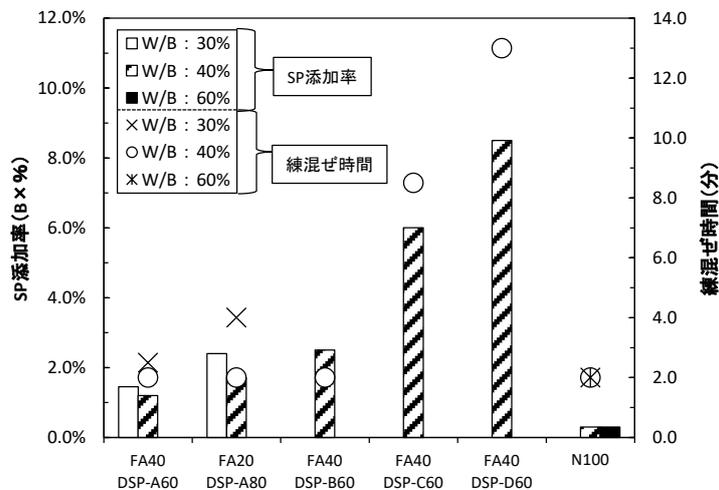


図 4.10 各調合の SP 添加率と練混ぜ時間

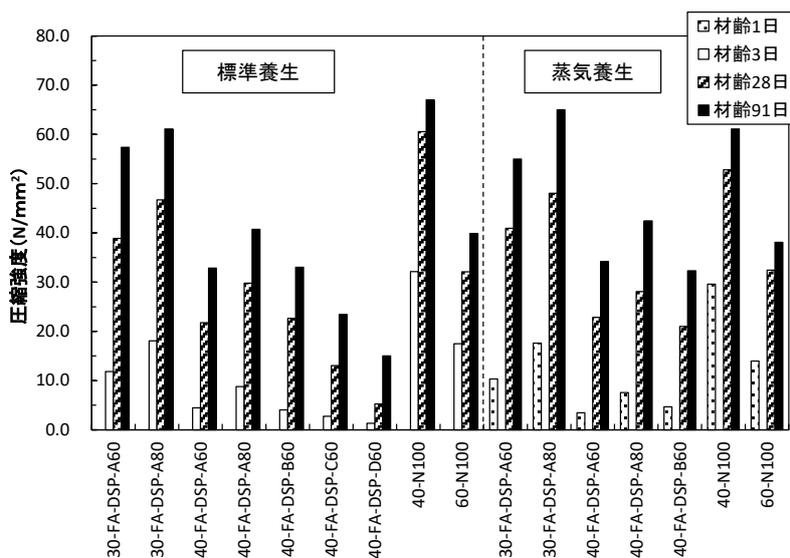


図 4.11 圧縮強度試験結果

図 4.12 はモルタルの材齢 28 日圧縮強度と中性化速度係数の関係を示したものである。図より、普通モルタルに比べ、RCCF モルタルの中性化速度係数は大きくなるが、強度レベルを高くすることにより、普通モルタルと同程度の中性化抵抗性を付与することができる。また、DSP の種類では、DSP 比表面積が小さく、DSP 置換率が大きい方が中性化速度係数を小さくすることができる。

#### 4.2.3 DSP, 高炉スラグ微粉末およびフライアッシュ

##### (1) 実験の目的

ここでは DSP, BFS および FA の 3 成分を結合材として用いたモルタルのフレッシュおよび

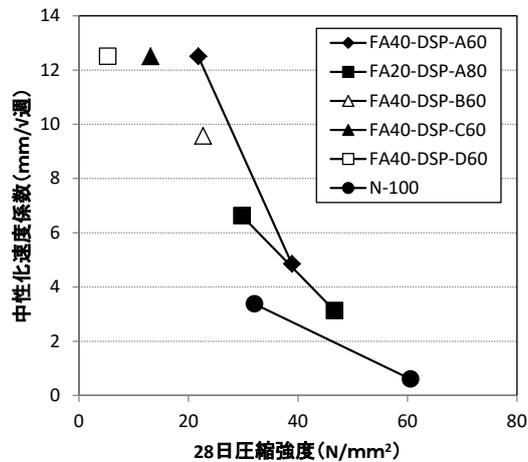


図 4.12 圧縮強度と中性化速度係数の関係

び硬化性状について検討した。また 4.2.1, 4.2.2 の結果から, DSP と BFS または FA を用いたモルタルの初期強度発現が小さいため, これを改善する目的で少量の H を混入し, 初期強度発現性や中性化抵抗性に及ぼす影響について検討した。

## (2) 実験概要

### a) 使用材料および調合

使用材料を表 4.7 に, 調合を表 4.8 に示す。結合材は DSP, BFS および FA の 3 成分と, さらに少量の H(置換率 10%)を使用した。モルタルの調合は, W/B=40%とし, 比較対象の N の場合のみ 50%についても実施した。DSP 置換率は, B×50%と 60%とした。

表 4.7 使用材料

項目	記号	材料名	密度 g/cm <sup>3</sup>	比表面積 cm <sup>2</sup> /g
結合材	N	普通ポルトランドセメント	3.16	3250
	DSP	乾燥スラッジ微粉末	2.72	6590
	BFS	高炉スラグ微粉末4000	2.90	4450
	FA	フライアッシュⅡ種	2.30	4170
	H	早強ポルトランドセメント	3.14	4450
細骨材	S1	大船渡産石灰砕砂	2.67	-
	S2	富津産山砂	2.58	-
混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能減水剤	-	-
	AE	AE剤	-	-
	DF	空気量調整剤(消泡剤)	-	-

### b) フレッシュおよび硬化性状

モルタルのフレッシュ性状に関する試験として, モルタルフロー試験(JIS R 5201)および空気量試験(JIS R 1128)を練混ぜ直後で実施した。なお, フロー値は 150±30mm 程度とし, この範囲となるように SP 添加率を定めた。また, 空気量は 4.5±1.5%とした。モルタルフローの経時試験では, 15 打フローの初期値が 180±15mm 程度となるように SP 添加率を調

表 4.8 モルタル調合表

No	記号	W/B (%)	DSP 置換率	単用量(kg/m <sup>3</sup> )							
				結合材(B)						細骨材	
				水	N	DSP	BFS	FA	H	S1	S2
1	40-BFS40-DSP60	40	60	240	-	360	240	-	-	723	592
2	40-BFS20-FA20-DSP60		60	240	-	360	120	120	-	716	586
3	40-BFS40-H10-DSP50		50	240	-	300	240	-	60	733	600
4	40-BFS20-FA20-H10-DSP50		50	240	-	300	120	120	60	719	588
5	40-N100	50	-	240	600	-	-	-	-	759	621
6	50-N100		-	225	450	-	-	-	-	850	696

整して行った。また 4.2.1, 4.2.2 より, DSP は原料である戻りコンが水和初期に石膏を消費していると考えられるため, 凝結時間試験(JIS A 1147)も行った。

硬化性状に関する試験は, 4.2.1 と同様とした。

(3) 実験結果および考察

a) フレッシュ性状

表 4.9 はフレッシュ試験結果を示したものである。表より練混ぜ直後のフロー値を 150 ±30mm とした場合, SP 添加率を 0.30~1.55(B×%)の範囲となった。BFS に FA を置換することにより, SP 添加率が小さくなった。これは FA が球形であるため, ボールベアリング効果の影響と考えられる。また少量の H(置換率 10%)を置換することにより, SP 添加率が小さくなった。空気量は, AE 剤の添加率を 0.03~0.20(B×%)の範囲とし, 全ての調合で同程度となり, 調合による差はほとんど見られなかった。

表 4.9 フレッシュ試験結果一覧表

No	記号	W/B (%)	DSP 置換率	混和剤添加率 (B×%)			モルタルフロー (mm)		空気量 (%)
				SP	AE	DF	0打	15打	
1	40-BFS40-DSP60	40	60	1.55	0.15	0.38	108	144	5.0
2	40-BFS20-FA20-DSP60		60	1.40	0.20	0.47	109	150	5.0
3	40-BFS40-H10-DSP50		50	1.10	0.10	0.38	108	152	4.8
4	40-BFS20-FA20-H10-DSP50		50	0.95	0.20	0.38	113	161	4.6
5	40-N100	50	-	0.30	0.03	0.06	109	167	5.0
6	50-N100		-	0.35	0.03	0.08	103	149	5.2

図 4.13, 4.14 は調合 No.2, 3, 5(表 4.8 記載)における 15 打フローの経時変化量(初期値との差)と凝結時間試験結果をそれぞれ示したものである。なお, 各調合の 15 打フローの初期値は DSP60-BFS20-FA20 が 171mm, DSP50-BFS40-H10 が 184mm, N100(40%)が 192mm である。図より RCCF モルタルは, 練混ぜ直後からこわばりが見られ, 15 打フローの差は普通モルタルに比べ, RCCF モルタルが大きくなった。凝結試験の始発時間は, 普通モルタルに比べて, RCCF モルタルは半分程度の時間で始発となった。これらの結果は, N に比べ DSP の SO<sub>3</sub> は小さく, DSP の石膏量が少ないため, N における石膏による水和の休止期<sup>1)</sup>が現れにくいことが一因であると考えられる。

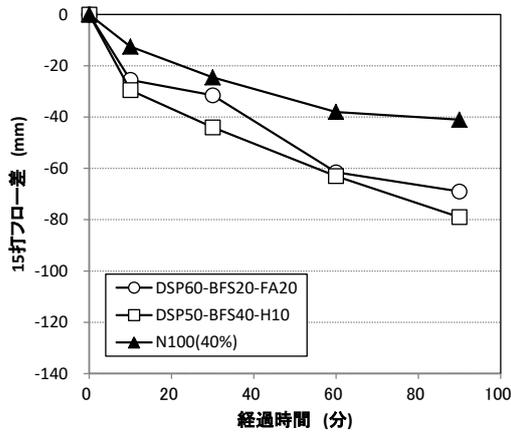


図 4.13 15 打フローロス経時変化

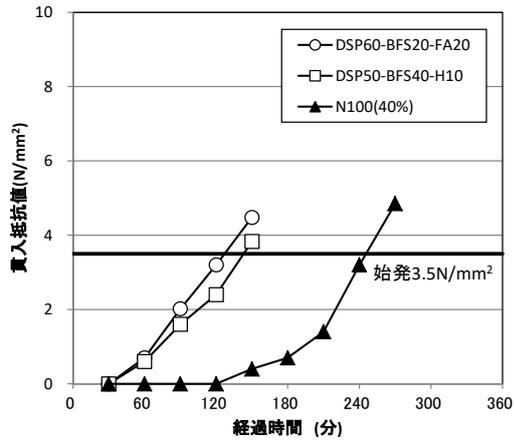


図 4.14 凝結試験結果

b) 硬化性状

圧縮強度試験結果を図 4.15 に示す。図より、BFS を B×40% とした DSP60-BFS40 の圧縮強度は、BFS および FA を B×20% とした DSP60-BFS20-FA20 の 1.2 倍程度であり、BFS の混合率が高く FA の混合率が低いほど圧縮強度が高い結果となった。H を B×10% 置換した DSP60-BFS40-H10 の圧縮強度は、H を用いていない DSP60-BFS40 の 1.1 倍程度であり、少量の H を用いた方が、圧縮強度が高くなる傾向が認められた。また、W/B40% の RCCF モルタルは、W/C50% の普通モルタルと同程度の圧縮強度が得られた。

材齢 120 日時点の自由収縮ひずみ結果を図 4.16 に示す。図より、RCCF モルタルの自由収縮試験のひずみは普通モルタルの 1.2~1.3 倍程度であり、RCCF モルタルは収縮ひずみが大きいことが確認された。また少量の H を用いた調合では、若干収縮ひずみが小さくなった

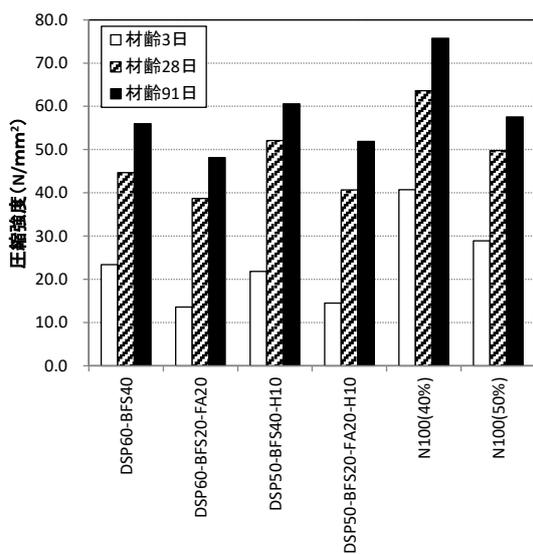


図 4.15 圧縮強度試験結果

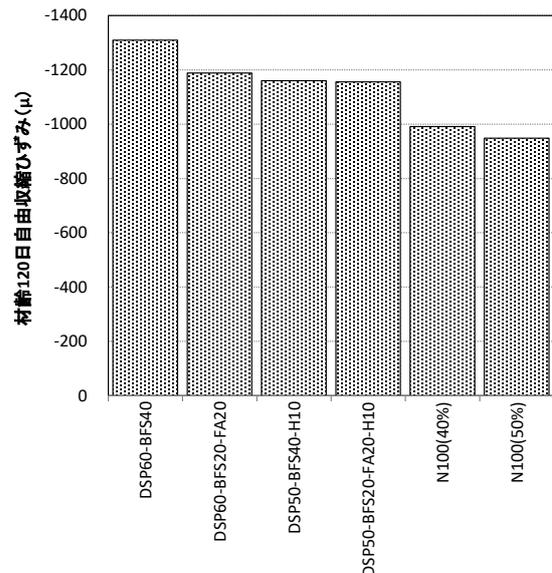


図 4.16 自由収縮ひずみ結果

た。圧縮強度と中性化速度係数の関係を図 4.17 に示す。図より、RCCF モルタルの中性化速度係数は、強度レベルが同程度の普通モルタルの 2 倍程度であり、圧縮強度が高いほど中性化速度係数が低い傾向が認められた。このことから、RCCF モルタルは普通モルタルに比べて中性化抵抗性は劣るものの、圧縮強度を高めることにより、実務に供することができるレベルの中性化抵抗性を付与できるものと考えられる。

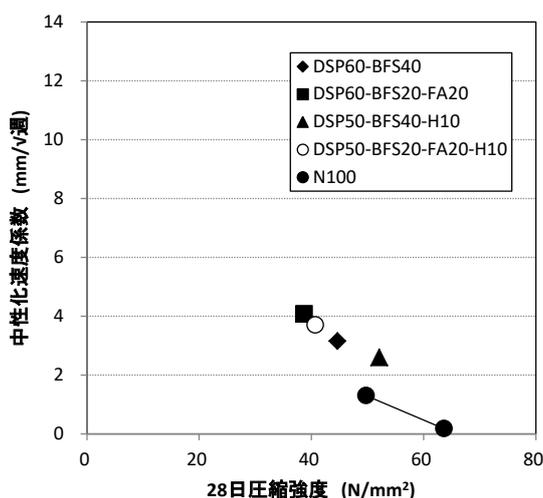


図 4.17 圧縮強度と中性化速度係数の関係

#### 4.2.4 中性化予測

##### (1) 実験の目的

ここでは、4.2.1～4.2.3 までの促進中性化試験結果から各種モルタルの任意材齢における中性化深さを算出し、一般 RC 構造物への適用性について検討した。

##### (2) 実験結果および考察

DSP による硬化体は、アルカリ性を保持することから、一般 RC 構造物に使用することが期待される。一般に、コンクリートの中性化の進行は、材齢の平方根に比例することが知られており、炭酸ガス濃度の影響についても(1)式の換算式が提案されている<sup>2)</sup>。

$$C = A \sqrt{(CO_2/5)} \cdot \sqrt{t} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、C : 中性化深さ (mm)

CO<sub>2</sub> : 炭酸ガス濃度 (%)

A : 促進中性化試験における中性化速度係数 (mm/√週)

t : 材齢 (週)

この(1)式を用い、屋外の環境条件(CO<sub>2</sub>濃度：0.05%と仮定)において、4.2.1～4.2.3の促進中性化試験結果から各種モルタルの中性化速度係数を用い、その関係を図4.18に示した。JASS5では、屋外条件での最小かぶり厚さは、計画供用期間の級が短期から超長期において部材の種類により20～40mmの範囲で示されている。図より計画供用期間を65年とした場合でも、RCCFモルタルは普通モルタル(記号：60-N100)に比べ、適切な調合選定により、中性化深さが小さくなることから、一般RC構造物にも十分適用可能であることが示唆された。

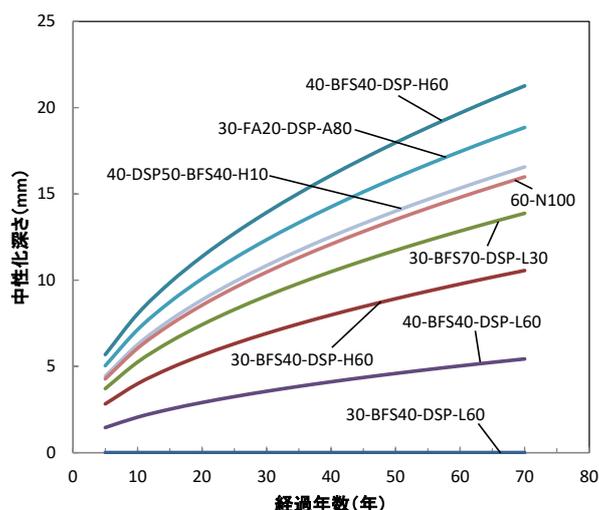


図 4.18 各調合における中性化深さ

#### 4.2.5 RCCF コンクリート

##### (1) 実験の目的

ここでは、4.2.1～4.2.4の結果を基にRCCF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し、4.2.1～4.2.3のモルタル強度から同一のW/Bにおけるコンクリート強度を算出し、設計基準強度24N/mm<sup>2</sup>以上となるコンクリートの調合を選定することを目的とした。

##### (2) 実験概要

###### a) 使用材料および調合

使用材料を表4.10に、調合を表4.11に示す。結合材はDSP、BFSと少量のHを使用した。コンクリートの調合は、W/B=40%とし、比較対象のNは50%とした。DSP置換率はB×50%とした。

###### b) フレッシュおよび硬化性状

コンクリートのフレッシュ性状に関する試験として、スランプ試験(JIS A 1101)および空気量試験(JIS R 1128)を練混ぜ直後で実施した。なお、スランプ値は18±2.5cmとし、この範囲となるようにSP添加率を定めた。また、空気量は4.5±1.5%とした。硬化性状に関する試

表 4.10 使用材料

項目	記号	材料名	密度 g/cm <sup>3</sup>	比表面積 cm <sup>2</sup> /g
結合材	N	普通ポルトランドセメント	3.16	3250
	DSP	乾燥スラッジ微粉末	2.72	6590
	BFS	高炉スラグ微粉末4000	2.90	4450
	H	早強ポルトランドセメント	3.14	4450
細骨材	S1	大船渡産石灰砕砂	2.67	-
	S2	富津産山砂	2.58	-
粗骨材	G	大船渡産石灰砕石	2.69	-
	SP	ポリカルボン酸系高性能減水剤	-	-
混和剤	AE	AE剤	-	-
	DF	空気量調整剤(消泡剤)	-	-

表 4.11 コンクリート調合表

No	記号	W/B (%)	DSP 置換率	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							
				水	結合材(B)				細骨材		粗骨材
				W	N	DSP	BFS	H	S1	S2	G
1	50-N	50	-	170	340	-	-	-	477	391	933
2	40-BFS40-DSP50-H10	40	50	170	-	212.5	170	42.5	418	342	933

表 4.12 フレッシュ試験結果一覧表

No	記号	W/B (%)	DSP 置換率	混和剤添加率 (B × %)			スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)
				SP	AE	DF			
1	50-N	50	-	0.55	0.05	0.06	20.0	38.5 × 36.5	4.3
2	40-BFS40-DSP50-H10	40	50	1.45	0.08	0.05	17.0	29.5 × 28.0	4.1

験は、材齢 3 日、28 日および 91 日について圧縮強度試験(JIS A 1108)を行った。試験体はφ 100×200mm の円柱供試体を作製し、打込み直後から 20℃封かん養生とした。材齢 3 日で脱型後、試験材齢まで 20±1℃の水中養生とした。

(3) 実験結果および考察

a) フレッシュ性状

表 4.12 はフレッシュ試験結果一覧表を示す。表より、スランプ値を 18±2.5cm とした場合、RCCF コンクリートは普通コンクリートに比べ、SP 添加率が大きくなった。空気量は普通コンクリートと同程度であり、調合による差はほとんど見られなかった。

b) 硬化性状

図 4.19 は 4.2.3 で行った調合 No.3, 6(表 4.8 記載)の普通モルタルおよび RCCF モルタルの強度と、これらのモルタルとモルタル部の調合の内、W/B と DSP の置換率が同一である普通コンクリートおよび RCCF コンクリートの強度の関係を示したものである。図より、普通および RCCF コンクリートともその強度はモルタルの強度とほぼ一次比例の関係となっており、モルタルの強度試験結果から、s/a は異なるものの、W/B と DSP の置換率が同一のコンクリートの圧縮強度を予測できるものと考えられる。図 4.19 から、(2)式および(3)式の相関式が得られた。

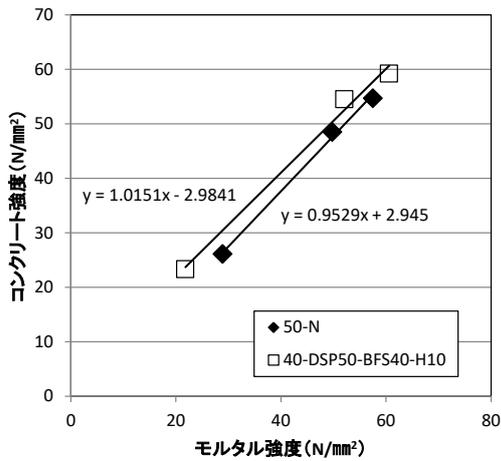


図 4.19 モルタルとコンクリート強度の関係

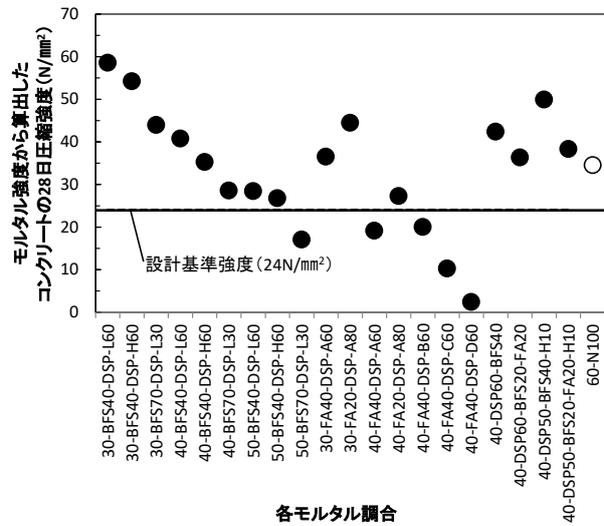


図 4.20 各調合における 28 日圧縮強度

$$y=0.9529x+2.945 \text{ (普通コンクリートの予測式) } \dots\dots (2)$$

$$y=1.015x-2.9841 \text{ (RCCF コンクリートの予測式) } \dots\dots (3)$$

ここに、 $y$  : コンクリートの 28d 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$x$  : モルタルの 28d 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

(2)式および(3)式をコンクリート強度の予測式とし、各種モルタルの調合に相当する普通コンクリートおよび RCCF コンクリートの強度を算出した。その結果を図 4.20 に示す。図より本研究で目標とした設計基準強度 24N/mm<sup>2</sup>以上となる RCCF コンクリートは、W/B と結合材の混合割合を選定することで製造が可能であることがわかる。

### 4.3 DSP を用いたクリンカーフリーコンクリートの耐久性

#### 4.3.1 中性化抵抗性に関する実験概要

実験の概要を表 4.13 に示す。実験要因は、水結合材比、結合材の構成割合、DSP の比表面積の 3 要因とし、表に示す No.1~No.9 の 9 水準にて、これらの要因が中性化抵抗性に及ぼす影響を検討した。また、強度増進や中性化抵抗性の向上を期待し、早強ポルトランドセメント (以下、H と称す) を結合材質量に対し 10%置換した条件を No.10 および No.11 で行った。比較対象として、高炉セメント B 種を用いたコンクリート(以下、BB コンクリートと称す)および普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート(以下、N コンクリートと称す)についても No.12~No.15 で実験を行った。

### 4.3.2 収縮ひび割れ抵抗性に関する実験概要

実験の概要を表 4.14 に示す。実験要因は、RCCF コンクリートの結合材の構成割合、DSP の比表面積の 2 要因とし、これらの要因が収縮ひび割れ抵抗性に及ぼす影響を検討した。また、比較対象として N コンクリートについても実験を行った。RCCF コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に関連する材料特性を把握するため、一般的な 20℃の養生条件において、表 4.14 に示す No.1, 4, 6, 8, 15 の 5 つの配合を対象に、凝結時間試験、圧縮強度試験、自由収縮試験を行った。前記試験に加え、RCCF コンクリートをプレキャスト部材に適用し

表 4.13 実験概要（中性化抵抗性に関する実験）

No	記号	W/B (%)	結合材の構成割合 (結合材質量×%)					中性化抵抗性に関する実験								
								フレッシュ試験			圧縮強度試験		促進中性化試験			
			DSP-L	DSP-M	BFS	FA	N	H	スランブ	空気量	コンクリート温度	材齢 28日	材齢 91日	2週	8週	26週
			cm	%	°C	N/mm <sup>2</sup>		mm								
1	45-DSP-L40-BFS50-FA10	45	40	-	50	10	-	-	○	○	○	○	○	○	○	
2	35-DSP-L40-BFS50-FA10	35							○	○	○	○	○	○		
3	55-DSP-L60-BFS30-FA10	55							○	○	○	○	○	○		
4	45-DSP-L60-BFS30-FA10	45	60	-	30	10	-	-	○	○	○	○	○	○	○	
5	35-DSP-L60-BFS30-FA10	35							○	○	○	○	○	○		
6	45-DSP-L80-BFS10-FA10	45							○	○	○	○	○	○		
7	35-DSP-L80-BFS10-FA10	35	80	-	10	10	-	-	○	○	○	○	○	○	○	
8	45-DSP-M60-BFS30-FA10	45							○	○	○	○	○	○		
9	35-DSP-M60-BFS30-FA10	35							○	○	○	○	○	○		
10	45-DSP-L50-BFS40-H10	45	50	-	40	-	-	10	○	○	○	○	○	○	○	
11	35-DSP-L50-BFS40-H10	35							○	○	○	○	○	○		
12	55-BB	55							○	○	○	○	○	○		
13	45-BB	45	-	-	42	-	58	-	○	○	○	○	○	○	○	
14	55-N	55							○	○	○	○	○	○		
15	45-N	45							○	○	○	○	○	○		

表 4.14 実験概要（収縮ひび割れ抵抗性に関する実験）

No	記号	W/B (%)	結合材の構成割合 (結合材質量×%)					収縮ひび割れ抵抗性に関する実験								
								一般的な養生条件			プレキャスト製造を模擬した養生条件					
			DSP-L	DSP-M	BFS	FA	N	H	凝結時間試験	圧縮強度試験		自由収縮試験	圧縮強度試験		自由収縮試験	拘束ひび割れ試験
			20℃	標準養生		※1	※2		材齢28日	材齢91日	材齢28日	材齢91日	材齢28日	材齢91日		
1	45-DSP-L40-BFS50-FA10	45	40	-	50	10	-	-	○	○	○	○				
2	35-DSP-L40-BFS50-FA10	35														
3	55-DSP-L60-BFS30-FA10	55														
4	45-DSP-L60-BFS30-FA10	45	60	-	30	10	-	-	○	○	○	○	○	○	○	
5	35-DSP-L60-BFS30-FA10	35														
6	45-DSP-L80-BFS10-FA10	45														
7	35-DSP-L80-BFS10-FA10	35	80	-	10	10	-	-	○	○	○	○				
8	45-DSP-M60-BFS30-FA10	45														
9	35-DSP-M60-BFS30-FA10	35														
10	45-DSP-L50-BFS40-H10	45	50	-	40	-	-	10								
11	35-DSP-L50-BFS40-H10	35														
12	55-BB	55														
13	45-BB	45	-	-	42	-	58	-								
14	55-N	55														
15	45-N	45														

※1 材齢7日まで20℃封かん→材齢7日以降20℃、RH60%気乾

※2 蒸気養生→材齢7日まで20℃封かん→材齢7日以降20℃、RH60%

た場合の収縮ひび割れ抵抗性を把握するため、プレキャスト製造を模擬した促進蒸気養生条件において、表 4.14 の No.4, 15 の 2 配合を対象に、圧縮強度試験、自由収縮試験、拘束ひび割れ試験を行った。蒸気養生条件は、注水から前置き 4 時間を目途に蒸気養生を開始し、20℃/h の勾配で昇温、最高温度 65℃、湿度 98%RH で 2.5 時間保持した後に、1 日程度かけて緩やかな勾配で室温まで降温した。

### 4.3.3 使用材料および配合

使用材料の一覧を表 4.15 に、配合表の一覧を表 4.16 に示す。実験に使用する DSP は、比表面積が小さい DSP-L、中程度の DSP-M の 2 種類とした。DSP と併用する産業副産物混和材は、BFS および FA とし、過去の検討結果から、BFS の混合率は結合材質量に対し 10～50% とし、FA の混合率は結合材質量に対し 10% とした。単位水量は 170kg/m<sup>3</sup>、粗骨材かさ容積は 0.56m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>、目標空気量は 4.5%、目標スランプは 18cm として配合を設定した。

表 4.15 使用材料

項目	記号	材料名	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)
結合材	DSP-L	乾燥スラッジ微粉末	3.05	4800
	DSP-M		2.63	7930
	BFS	高炉スラグ微粉末4000	2.90	4450
	FA	フライアッシュⅡ種	2.28	4420
	N	普通ポルトランドセメント	3.16	3250
	H	早強ポルトランドセメント	3.14	4450
細骨材	S1	石灰砕砂	2.67	-
	S2	山砂	2.58	-
粗骨材	G	石灰砕石	2.69	-
高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系	1.06	-

表 4.16 配合表

No	記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )										
				W	DSP-L	DSP-M	BFS	FA	N	H	S1	S2	G	SP
1	45-DSP-L40-BFS50-FA10	45	46.9	170	151		189	38			444	363	933	0.70
2	35-DSP-L40-BFS50-FA10	35	43.7	170	194		243	49			389	318	933	0.95
3	55-DSP-L60-BFS30-FA10	55	48.8	170	185		93	31			479	392	933	0.80
4	45-DSP-L60-BFS30-FA10	45	47.0	170	227		113	38			446	365	933	0.80
5	35-DSP-L60-BFS30-FA10	35	43.9	170	291		146	49			393	322	933	1.00
6	45-DSP-L80-BFS10-FA10	45	47.1	170	302		38	38			447	366	933	0.90
7	35-DSP-L80-BFS10-FA10	35	44.0	170	389		49	49			395	323	933	1.20
8	45-DSP-M60-BFS30-FA10	45	46.0	170		227	113	38			428	350	933	2.00
9	35-DSP-M60-BFS30-FA10	35	42.5	170		291	146	49			370	303	933	2.90
10	45-DSP-L50-BFS40-H10	45	47.3	170	189		151			38	451	369	933	0.70
11	35-DSP-L50-BFS40-H10	35	44.2	170	243		194			49	398	325	933	0.95
12	55-BB	55	49.2	170			130		179		486	398	933	0.55
13	45-BB	45	47.5	170			159		219		454	372	933	0.55
14	55-N	55	49.5	170					309		492	402	933	0.70
15	45-N	45	47.8	170					378		460	376	933	0.55

### 4.3.4 実験方法

#### (1) 中性化抵抗性に関する実験

本実験では、練混ぜ量を 35L とし、50L の 2 軸強制練りミキサを用いて練混ぜを行った。フレッシュコンクリートの試験として、スランプ(JIS A 1101)、空気量(JIS A 1128)、コンクリート温度(JIS A 1156)、単位容積質量(JIS A 1116)の各試験を行った。また、No.1, 4, 6, 8, 15 について、凝結時間試験(JIS A 1147)を行った。

圧縮強度試験用供試体として、1 水準につき φ100×200mm の円柱供試体を 6 体作製した。打設直後から 20℃封かん養生とし、材齢 3 日で脱型後、標準養生とした。材齢 28, 91 日で圧縮強度試験 (JIS A 1108) を行った。

促進中性化試験は、1 水準につき 100×100×400mm の試験体を 2 体作製した。促進中性

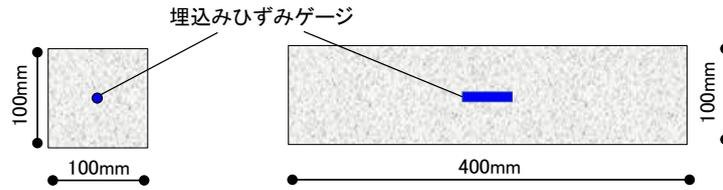


図 4.21 自由収縮試験体

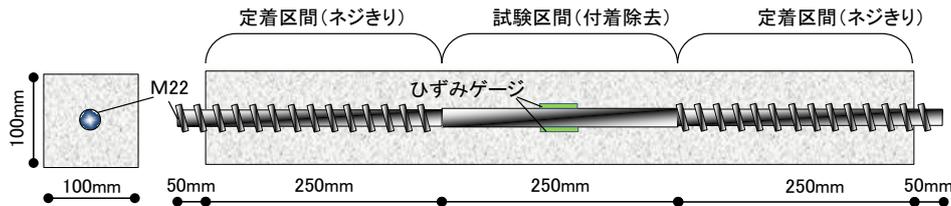


図 4.22 拘束ひび割れ試験体の詳細

化試験は、JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験方法に準拠した。材齢 3 日で脱型し、材齢 28 日まで標準養生、材齢 56 日まで室温 20℃、湿度 60%RH 気乾養生、材齢 56 日から 20℃60%RH、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)濃度 5%の促進条件とした。促進材齢 14 日、56 日、182 日において、中性化深さを測定した。

#### (2) 収縮ひび割れ抵抗性に関する実験

No.1, 4, 6, 8, 15 については、室温 20℃の環境における自由収縮試験を行った。1 水準につき、図 4.21 に示す 100×100×400mm の自由収縮試験体を 2 体作製し、材齢 7 日まで 20℃封かん養生、材齢 7 日以降は 20℃、60%RH で気乾養生に供した。打設直後から埋込みゲージによりひずみの計測を行い、乾燥材齢 182 日まで計測を行った。自由ひずみは、凝結時間試験より得られた始発時間を原点として計測し、乾燥収縮ひずみでは乾燥開始材齢を原点とした。供試体の底面は型枠との付着を除去するため、厚さ 1mm のテフロンシートを敷き、その上に厚さ 0.1mm のポリエステルフィルムを敷いた。長手方向の側面および上面は、厚さ 0.1mm のポリエステルフィルムのみとした。試験体の端部は、コンクリートの膨張収縮挙動に対する拘束を無くすため、厚さ 3mm のポリスチレンボードの上に、厚さ 0.1mm のポリエステルフィルムを重ねた。コンクリート打設後、直ちにコンクリート打設面上にポリエステルフィルムを載せ、乾燥を防ぐため、更に濡れウエスを被せた。気乾養生時は、4 面乾燥とした。

表 4.16 に示す No.4 および No.15 の 2 配合について、前述の蒸気養生条件とした供試体の圧縮強度試験(JIS A 1108)、静弾性係数試験(JIS A 1149) および割裂引張強度試験(JIS A 1113)を行った。1 配合につき、φ100×200mm の円柱試験体を 21 体作製し、蒸気養生後は材齢 7 日まで 20℃封かん養生、材齢 7 日以降は 20℃、60%RH の気乾養生に供した。12 体は材齢 3, 7, 28, 91 日にて、3 体ずつ圧縮強度・静弾性係数試験に、残り 9 体は、材齢 7, 28, 91 日にて、3 体ずつ割裂引張強度試験に供した。

No.4 および No.15 の 2 配合について、蒸気養生条件における自由収縮試験を行った。1

配合につき、図 4.21 に示す 100×100×400mm の自由収縮試験体を 2 体作製し、蒸気養生後は上記と同一の養生条件とした。打設直後からひずみの計測を行い、乾燥材齢 182 日まで計測を行った。自由ひずみの原点、および型枠面・打設面の処理は同じとした。気乾養生時は、2 面乾燥とするため、試験体の底面および打設面はアルミテープを貼付し封かん養生とした。

No.4 および No.15 の 2 配合について、蒸気養生条件における拘束ひび割れ試験を行った。1 配合につき、図 4.22 に示す 100×100×750mm の拘束ひび割れ試験体を 2 体作製した。試験体は文献 3) で提案されているコンクリートの収縮ひび割れ試験方法を参考に、100×100×750mm とし、定着区間は 250mm とした。拘束体である鉄筋は丸鋼φ22 とし、定着部を M22 相当のネジ加工とした<sup>3)</sup>。なお、鉄筋比は約 3.8% となる。養生条件、型枠面および打設面の処理は前記と同一とした。

#### 4.3.5 実験結果および考察

##### (1) RCCF コンクリートの中性化抵抗性

##### a) フレッシュコンクリート

各配合のスランプおよび SP 添加量の関係を図 4.23 に、各配合の空気量を図 4.24 に示す。図より、No.9 (記号: 35-DSP-M60-BFS30-FA10) 以外の水準では、SP 添加量を調整することにより、スランプ 18±2.5cm を満足する結果となった。No.9 は、図より SP 添加量が結合材質量の 2.9% と非常に大きいが、スランプは 12.5cm と小さい。これは、No.9 で用いた DSP の比表面積が大きく、特に水結合材比が低い条件において、粘性が増大したことと、DSP の原料である戻りコンが水和初期に石膏を消費していると考えられる。特に DSP-M は戻りコンから製造するまでの時間が DSP-L に比べ長くなるため、DSP-M の石膏量が少なくなり、N における石膏による水和の休止期が現れにくいことが一因であると考えられる。また、空気量は全水準において 4.5±1.5% の範囲となった。

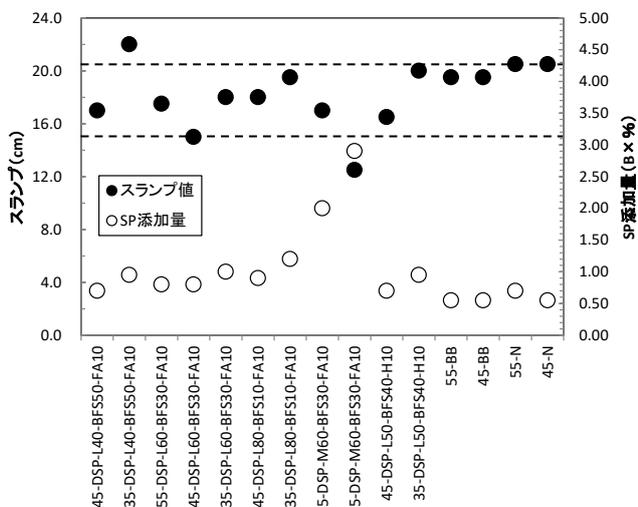


図 4.23 各配合のスランプおよび SP 添加量

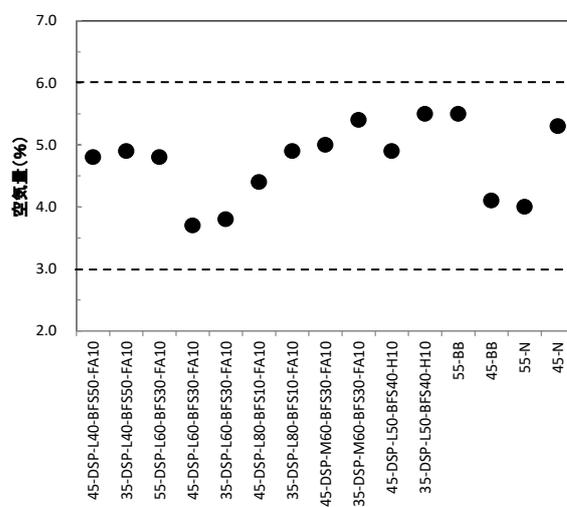


図 4.24 各配合の空気量

## b) 圧縮強度

結合材水比と圧縮強度の関係を図 4.25 に示す。図は材齢 28 日における圧縮強度を示しているが、RCCF コンクリートは N コンクリートや BB コンクリートと同様に、結合材水比 (B/W) が高くなるに従い圧縮強度が増加することが確認され、圧縮強度と結合材水比の関係の傾きもおおむね同等であった。

DSP 混合率が圧縮強度に与える影響を図 4.26 に、DSP の比表面積が圧縮強度に与える影響を図 4.27 に示す。

図 4.26 から、DSP 混合率は結合材質量に対し 60~80%の範囲で圧縮強度が高くなる結果となった。また同水結合材比の条件において、最も強度が高い 45-DSP-L60-BFS30-FA10 は、45-N に比べて  $5\text{N/mm}^2$  低下する程度であり、45-BB に比べて  $2.5\text{N/mm}^2$  低下する程度であり、W/B をわずかに小さくすることで RCCF コンクリートの圧縮強度は、N コンクリートや BB コンクリートと同等にできることが確認された。これらは、DSP による BFS へのアルカリリ

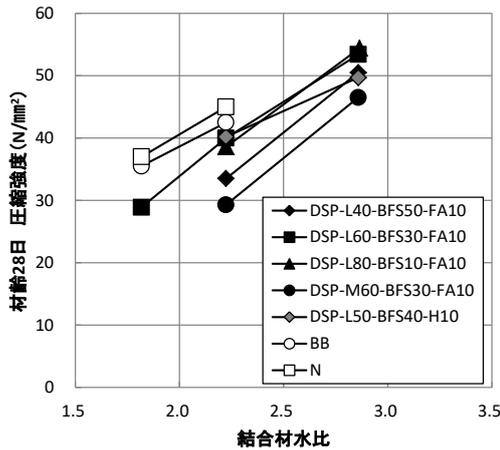


図 4.25 結合材水比と圧縮強度

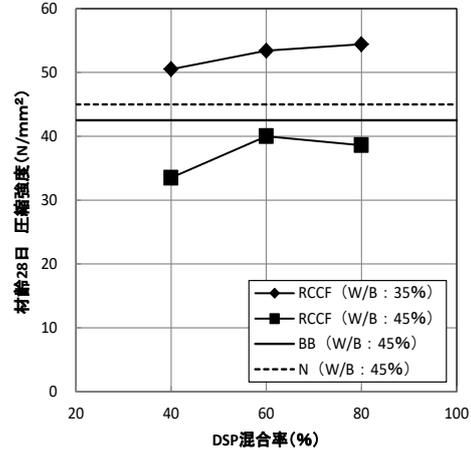


図 4.26 DSP 混合率と圧縮強度

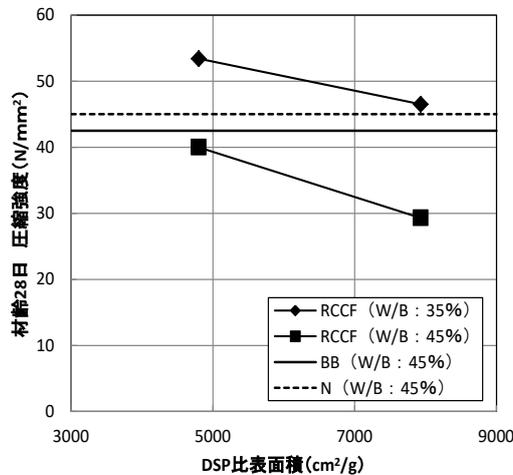


図 4.27 DSP 比表面積と圧縮強度

刺激材およびFAのポズラン反応の作用の両方が寄与したためであると考えられる。

図 4.27 から、DSP の比表面積が大きいほど圧縮強度が低下しており、その差は 10～15N/mm<sup>2</sup>程度であった。これらはこれまでの検討からも DSP の比表面積が大きくなる程、強度発現が低下することを報告している。このことから、DSP の品質を確保するためには、比表面積の管理が重要であることが示唆された。

### c) 促進中性化

促進中性化試験における中性化深さの結果を図 4.28 に、DSP 混合率が中性化深さに与える影響を図 4.29 に、また DSP の比表面積が中性化深さに与える影響を図 4.30 に示す。図 4.28 および図 4.29 から、DSP 混合率が結合材質量に対し 40～80%の範囲で混合率が大きくなるほど中性化深さが小さくなる結果となった。また W/B が小さいほど中性化深さは小さ

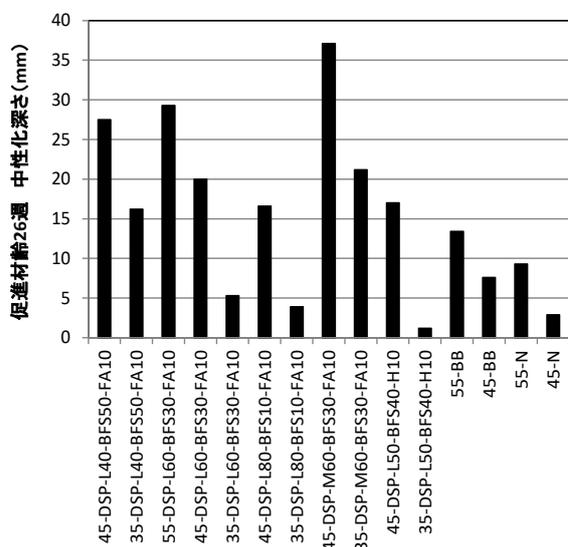


図 4.28 中性化深さの結果

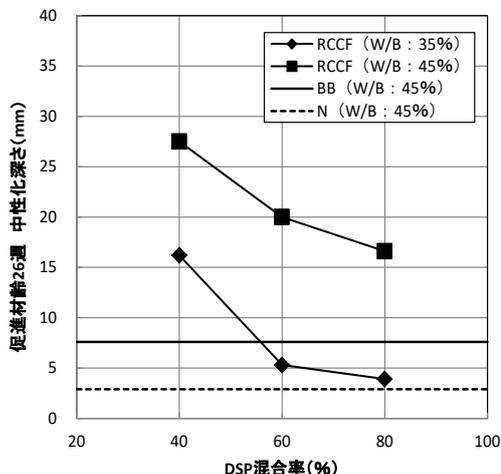


図 4.29 DSP 混合率が中性化深さに与える影響

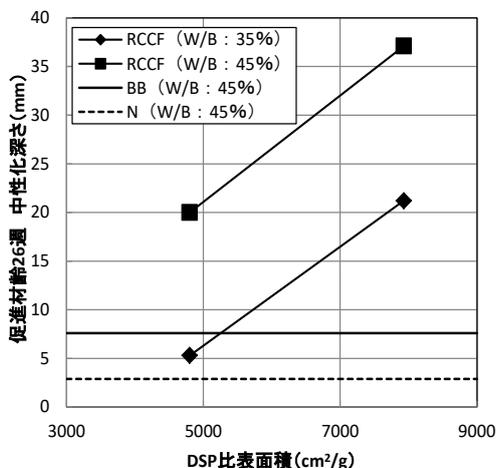


図 4.30 DSP 比表面積と中性化深さ

くなった。さらに H を使用した DSP-L50-BFS40-H10 は、DSP 混合率が 50% であるが、DSP 混合率が 80% である DSP-L80-BFS10-FA10 と同程度の中性化深さであり、中性化抵抗性の向上が確認された。また、同水結合材比の条件では、最も中性化深さが小さい 45-DSP-L80-BFS10-FA10 においても、45-BB の 2 倍程度の中性化深さであった。これらは N コンクリートでは材齢が経過するに伴い生成する  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の量が増加するが、RCCF コンクリートでは材齢の経過に伴い  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の量は副産物混和材の潜在水硬性等により消費されることにより、中性化深さが大きくなるが、DSP 混合率が大きくなることにより、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の量が増大し、その影響は小さくなったためであると考えられる。

また図 4.30 から、DSP 比表面積と中性化深さの関係は、DSP 比表面積が小さいほど、また W/B が小さいほど、中性化深さは小さくなった。これらは、前述した通り、DSP は比表面積が小さいほど未水和セメントの含有量が多くなるため、反応に伴い生成される  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の量が比表面積が大きい場合より多くなるためであると考えられる。また、W/B が小さいほど、硬化体組織が緻密になったこと等が二酸化炭素の拡散に影響したためであると考えられる。

## (2) RCCF コンクリート耐久性設計手法の検討

RCCF コンクリートの RC 造構造物への適用に向け、前述の促進中性化試験結果から、RCCF コンクリートの耐久性設計を試みた。標準養生 28 日の圧縮強度と  $\text{CO}_2$  濃度 5% 促進環境下での中性化速度係数の関係を図 4.31 に示す。図 4.31 から、RCCF コンクリートの圧縮強度に対する中性化速度係数は、配合により異なり、比較対象である BB コンクリートや N コンクリートに比べて大きい傾向であった。一方で、圧縮強度の増加に伴い中性化速度係数は低減していることから、RCCF コンクリートにおいても配合を最適化し強度を高めることで、N や BB コンクリートに対して同等以上の中性化抵抗性を付与することが可能であるものと考えられる。また図 4.31 の圧縮強度と中性化速度係数の関係から、RCCF コンクリートの中性化速度係数実験式として、結合材の混合率の関数となる(1)式を得た。図 4.32 は、RCCF コンクリートの中性化速度係数の実験結果と、(1)式により算定した中性化速度係数を比較しており、(1)式により中性化速度係数の実験結果を精度良く再現できることが確認された。

$$\begin{aligned}
 A(5.0) &= -0.198 \cdot f_c(28) + \beta \\
 \beta &= -0.020 \cdot DSP(L) + 0.003 \cdot DSP(M) + 0.014 \cdot B \\
 &\quad + 0.112 \cdot F - 0.037 \cdot H + 11.49
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここに、 $A(5.0)$  :  $\text{CO}_2$  濃度 5% 中性化速度係数 ( $\text{mm}/\sqrt{\text{週}}$ )

$f_c(28)$  : 標準養生材齢 28 日の圧縮強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

DSP-L, DSP-M, BFS, FA, H : 結合材の混合率 (結合材%)

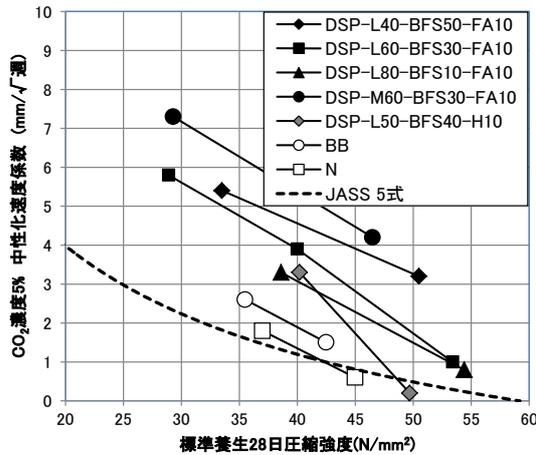


図 4.31 標準養生 28 日圧縮強度と  
中性化速度係数の関係

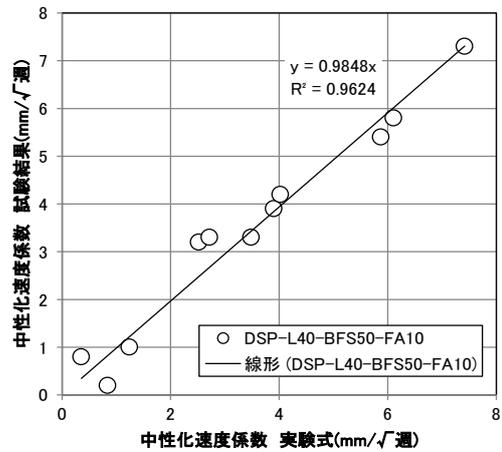


図 4.32 中性化速度係数実験式の精度

この (1) 式より算定した中性化速度係数を用い、炭酸ガス濃度の影響について (2) 式の換算式を用いた<sup>2)</sup>。

$$C = A \sqrt{\left(\frac{CO_2}{5}\right)} \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

ここに、

C : 中性化深さ (mm)

CO<sub>2</sub> : 炭酸ガス濃度 (%)

A : 促進中性化試験における中性化速度係数 (mm/√週)

t : 材齢 (週)

上記 (2) 式より、屋外の環境条件 (CO<sub>2</sub>濃度 : 0.05%と仮定) における各種配合の中性化速度係数を算出した。2012 年制定コンクリート標準示方書 (設計編 : 標準) では、耐久性に関する照査が定められており、中性化に対する照査が記載されている。この中性化に対する照査に示される手法に従い、RCCF コンクリートを用いた場合の (3) 式で 1.0 以下であることを算定した<sup>4)</sup>。なお、設計かぶり厚さは 30mm、中性化残りは 25mm、施工誤差は 10mm、安全係数は 1.15、中性化に対する耐用年数は 65 年、環境作用は乾燥しやすい環境の 1.6、コンクリートの材料係数は 1.0 をそれぞれ用いた。

$$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} \leq 1.0 \quad (3)$$

ここに、

γ<sub>i</sub> : 構造物係数, y<sub>lim</sub> : 鋼材腐食発生限界深さ, y<sub>d</sub> : 中性化深さの設計値

上記の条件により、中性化に対する照査を行った結果を表 4.17 に示す。これらの結果より、W/B を 35% で DSP 混合率 80% 以上にすることで、耐用年数 65 年程度あれば、RCCF コンクリートにおいても所要の耐久性を満足する RC 造構造物を実現できるものと考えられる。なお、本検討で用いた中性化残りの値 (25mm) は腐食開始の中性化残りを設定する資料が無い場合の安全側の対処としての条件で決めたものであり<sup>6)</sup>、RCCF コンクリートに関しては今後データを蓄積して新たに検討する必要があると考えられる。

表 4.17 中性化に対する照査

No	記号	W/B (%)	中性化に対する照査	
			$\gamma_i (y_d/y_{im})$	≤1.0
1	45-DSP-L40-BFS50-FA10	45	12.57	
2	35-DSP-L40-BFS50-FA10	35	5.39	
3	55-DSP-L60-BFS30-FA10	55	13.06	
4	45-DSP-L60-BFS30-FA10	45	8.35	
5	35-DSP-L60-BFS30-FA10	35	2.66	
6	45-DSP-L80-BFS10-FA10	45	7.45	
7	35-DSP-L80-BFS10-FA10	35	0.76	
8	45-DSP-M60-BFS30-FA10	45	15.87	
9	35-DSP-M60-BFS30-FA10	35	8.60	
10	45-DSP-L50-BFS40-H10	45	5.81	
11	35-DSP-L50-BFS40-H10	35	1.80	

### (3) RCCF コンクリート収縮ひび割れ抵抗性

#### a) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を表 4.18 に、凝結時間試験結果を図 4.33 に示す。表 4.18 から、全ての配合において、所要のスランプおよび空気量を満足する結果となった。一方で、高性能 AE 減水剤の使用量は、比表面積の高い DSP-M を用いた No.4 が著しく大きい結果となった。図 4.33 から、比表面積の大きい DSP-M を用いた No.4 の始発時間は 3 時間程度と早く、それ以外の RCCF コンクリートおよび N コンクリートは 5.5 時間程度であった。これは、前述のとおり DSP の原料である戻りコンが水和初期に石膏を消費していることが一因であると考えられる。

#### b) 圧縮強度 (標準養生)

標準養生圧縮強度試験結果を図 4.34 に示す。中性化抵抗性に関する実験の強度試験結果と同様に、結合材に対する DSP の混合率が 60% から 80% と大きくなるほど高く、比表面積

表 4.18 フレッシュコンクリートの試験結果

No	配合	高性能 AE減水剤 (B × %)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)	単位容積 質量 (kg/L)
1	45-DSP-L40-B50-F10	0.65%	18.5	5.2	16.0	2294
2	45-DSP-L60-B30-F10	0.70%	18.5	4.8	20.0	2301
3	45-DSP-L80-B10-F10	0.90%	18.5	3.9	19.8	2324
4	45-DSP-M60-B30-F10	2.00%	20.5	4.9	20.9	2285
5	45-N	0.50%	18.0	3.4	19.6	2361

の影響については、DSP-M に比べ DSP-L を使用した配合で強度が高い結果となった。

c) 自由収縮試験 (20°C)

自由収縮試験結果を図 4.35 に、材齢 189 日の自由ひずみ結果を図 4.36 に示す。図 4.36 から、RCCF コンクリートの自由ひずみは N コンクリートに比べて 100~200 $\mu$  程度大きい結果となった。また、DSP の混合率が最も低い 40% で自由収縮ひずみが最も小さく、DSP の比表面積が大きい DSP-M を使用した配合で収縮が大きい傾向にあった。これらは圧縮強度および結合材容積の差による影響と考えられる。

乾燥開始時点の自由ひずみ結果を図 4.37 に、乾燥開始から乾燥材齢 182 日時点までの乾燥収縮ひずみ結果を図 4.38 に示す。図 4.37 から、RCCF コンクリートの乾燥開始時点の自由ひずみは、N コンクリートに比べて 100~300 $\mu$  程度大きく、特に比表面積の大きい DSP-M を用いた No.4 が著しく大きい結果となった。図 4.38 から、RCCF コンクリートの乾燥材齢 182 日時点の乾燥収縮ひずみは、N コンクリートと同程度の結果であった。以上のことから、RCCF コンクリートの自由ひずみは N コンクリートに対して 100~200 $\mu$  程度大きく、乾燥

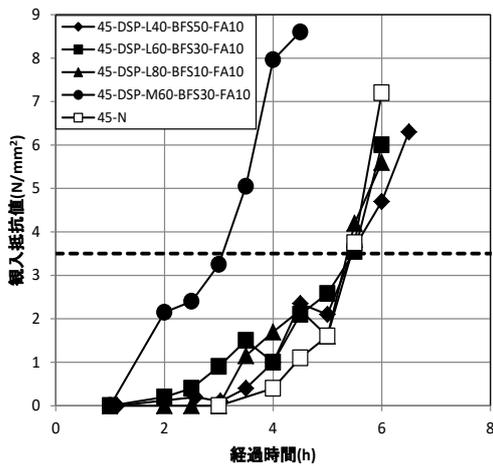


図 4.33 凝結時間試験結果

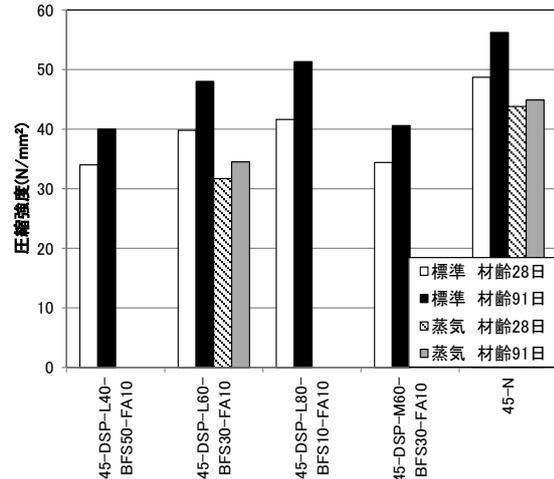


図 4.34 圧縮強度試験結果

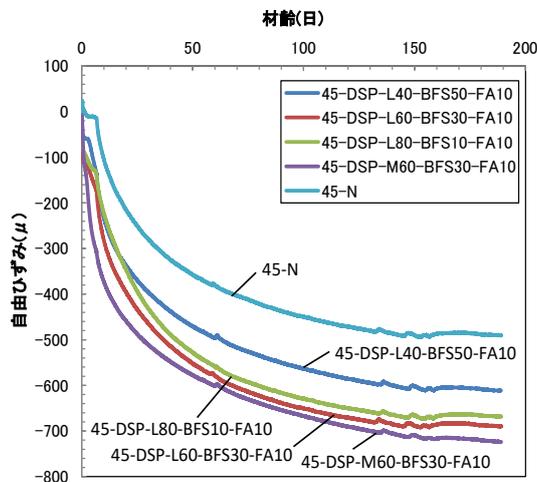


図 4.35 自由収縮試験結果 (20°C)

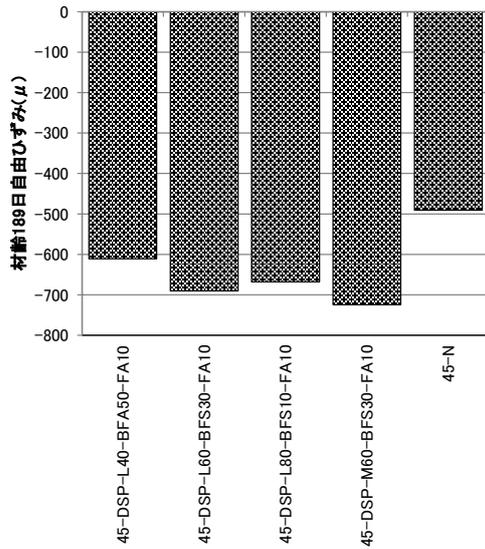


図 4.36 材齢 189 日時点の自由ひずみ結果

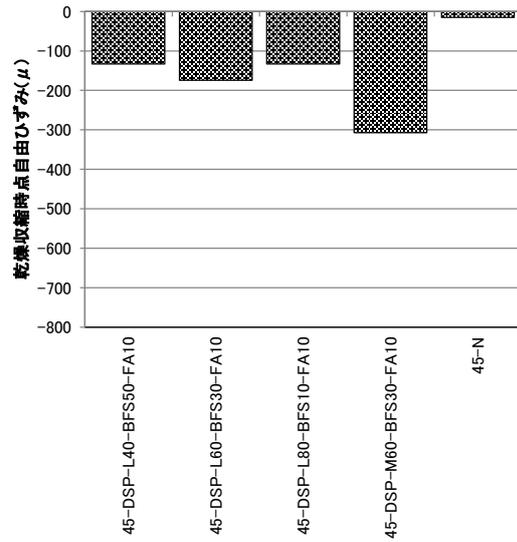


図 4.37 乾燥開始時点の自由ひずみ結果

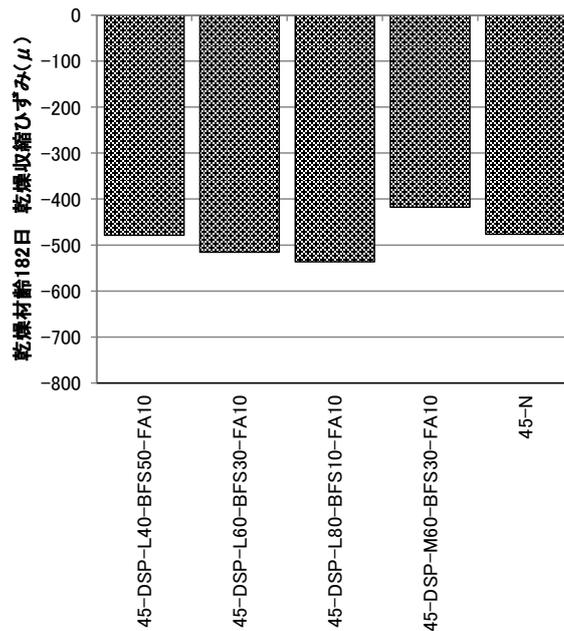


図 4.38 乾燥材齢 182 日時点の乾燥収縮ひずみ結果

収縮ひずみは同等であった。また、自由ひずみの増大は、乾燥開始前の自己収縮ひずみに起因すると想定されることが明らかとなった。この自己収縮ひずみは、結合材容積の差や、既往の研究から高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの自己収縮が大きくなること、さらに DSP の石膏量が少なくなったことなどが影響したものと考えられる<sup>16)</sup>。

#### d) 圧縮強度(蒸気養生)

蒸気養生条件における圧縮強度試験結果を表 4.19 に示す。図 4.34 から、RCCF コンクリ

表 4.19 蒸気養生力学特性試験結果

配合	試験項目	3日	7日	28日	91日
45-DSP-L60 -BFS30-FA10	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	20.3	24.4	31.7	34.5
	静弾性係数(×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )	22.4	26.0	22.7	25.1
	割裂引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	-	2.2	2.5	2.1
45-N	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	30.7	35.5	43.8	44.9
	静弾性係数(×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )	28.0	29.7	30.7	29.0
	割裂引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	-	3.0	3.5	2.5

ートの標準養生 28 日圧縮強度は、N コンクリートに対して 8N/mm<sup>2</sup>程度低い結果であったが、RCCF コンクリートの蒸気養生 28 日圧縮強度は N コンクリートに対して 12N/mm<sup>2</sup>程度低い結果となった。これは、蒸気養生により初期強度は大きくなったものの材齢 28 日以降では強度増進が見られなかったためと考えられる。

e) 自由収縮(蒸気養生)

蒸気養生条件における自由ひずみ結果を図 4.39 に示す。図 4.39 の自由ひずみは蒸気養生の温度変化に伴い生じる温度ひずみ(打設直後の温度からの温度変化(°C)×コンクリートの線膨張係数 10×10<sup>-6</sup>/°C)を除去した値であるが、コンクリートの種類によらず、いずれも大きな膨張ひずみが得られる結果となった。この原因としては、コンクリートの線膨張係数は、加水直後では大きく、その後急激に小さくなることが知られており、温度ひずみが温度上昇時には大きく、温度降下時では小さくなり、温度上昇時の膨張ひずみが残ったことが可能性として考えられる。材齢 7 日以降は、気乾養生であり乾燥に伴い収縮している。材齢 80 日時点の自由ひずみは、普通コンクリートが 0μ 程度であるのに対し、RCCF コンクリートは収縮側にて 300μ 程度であり、蒸気養生条件下において RCCF コンクリートの方が自由ひずみが大きい結果となった。

f) 拘束ひび割れ試験結果(蒸気養生)

蒸気養生条件における実ひずみ結果を図 4.40 に示す。この実ひずみは、拘束ひび割れ試験における鉄筋ひずみであり、上記と同様に温度ひずみを除去した値を示す。図 4.40 から、拘束ひび割れ試験における実ひずみにおいても、自由ひずみと同様に、初期に膨張ひずみが残存しており、乾燥開始後収縮が進行する挙動を示した。実ひずみは自由ひずみに対して、初期の膨張ひずみ、乾燥開始後の収縮ひずみが小さいが、これは内部鉄筋に拘束されたためと考えられる。

蒸気養生条件における応力およびひび割れ強度結果を図 4.41 に示す。拘束ひび割れ試験の実ひずみ測定結果から、鉄筋とコンクリートの力の釣合いによりコンクリートに生じている応力を算定した。ひび割れ強度は、材齢 28 日における割裂引張強度試験結果に 0.7 を乗じて算定した<sup>5)</sup>。図 4.41 から、硬化初期には圧縮応力が導入されており、自由収縮試験において膨張ひずみが得られた挙動と合致する傾向が認められた。その後、乾燥収縮の進展に伴って引張応力が大きくなっているが、N コンクリートで 0.7N/mm<sup>2</sup>程度、RCCF コンク

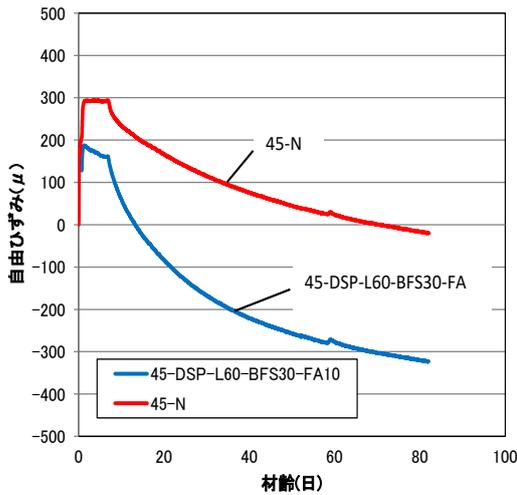


図 4.39 蒸気養生における自由ひずみ結果

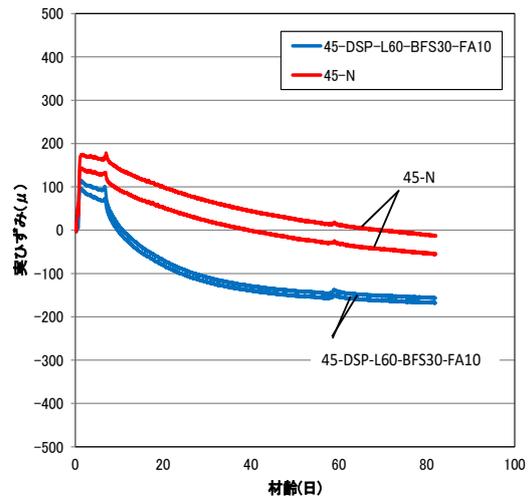


図 4.40 蒸気養生における実ひずみ結果

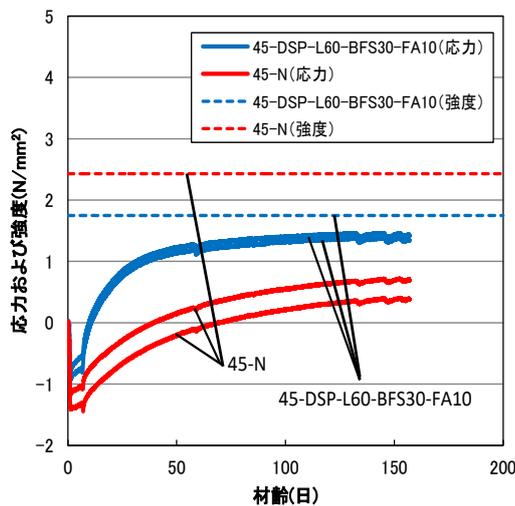


図 4.41 蒸気養生における応力およびひび割れ強度結果

リートにおいても  $1.4\text{N/mm}^2$ 程度の引張応力であり、コンクリートのひび割れ強度に対して小さく、材齢 150 日においても、ひび割れが生じていないことを確認した。本試験はプレキャスト部材で比較的内部鉄筋量の多い梁部材を想定し、鉄筋比 3.8%程度で実験を行っており、この条件においてもひび割れが生じていないことから、RCCF コンクリートでプレキャスト部材を製造した際に、収縮ひび割れが大きな問題となる可能性は低いと予想される。また本検討は W/B45%のみであるが、これより低水結合材比となった場合、自己収縮は大きくなり、乾燥収縮は小さくなると考えられる。初期に生じる自己収縮は鋼材等による拘束が生じる前にある割合が収束し、またプレキャストコンクリートは比較的鉄筋拘束が小さいため、自己収縮が増大してもひび割れ発生に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

## 4.4 まとめ

本章の検討で得られた結論を以下に示す。

- (1) DSP と BFS において RCCF モルタルのフレッシュ性状は、普通モルタルに比べ、混和剤添加率が大きくなり、DSP 比表面積が大きくなるほど、混和剤添加率が大きくなった。硬化性状は、普通モルタルに比べ、同程度の強度が得られ、収縮ひずみは大きくなり、中性化速度係数は大きくなった。中性化速度係数は強度レベルを高くすることにより、同程度の中性化抵抗性が付与できることがわかった。
- (2) DSP と FA において RCCF モルタルのフレッシュ性状は普通モルタルに比べ、混和剤添加率が大きくなり、DSP 比表面積が大きくなるほど、混和剤添加率が大きくなった。硬化性状は、普通モルタルに比べ、上記(1)よりも強度低下が見られ、収縮ひずみは大きくなり、中性化速度係数は大きくなった。中性化速度係数は強度レベルを高くすることにより、同程度の中性化抵抗性が付与できることがわかった。また標準養生と蒸気養生の違いは特に見られなかった。
- (3) DSP と BFS と FA において RCCF モルタルのフレッシュ性状は普通モルタルに比べ、混和剤添加率が大きくなり、FA や H を置換することにより、混和剤添加率は小さくなった。また 15 打フローの経時変化と凝結試験から、RCCF モルタルはフローロスが大きく、始発が早いことが判明した。硬化性状は、普通モルタルに比べ、強度低下が見られ、収縮ひずみは大きくなり、中性化速度係数は大きくなった。しかし少量の H を用いることで、強度、収縮ひずみおよび中性化抵抗性を向上させることができた。
- (4) 中性化予測では、屋外の環境条件(CO<sub>2</sub>濃度：0.05%)で計画供用期間を 65 年とした場合でも RCCF モルタルは普通モルタル(記号：60-N100)に比べ、適切な調合選定により、中性化深さが小さくなり、一般 RC 構造物にも十分適用可能であることが示唆された。
- (5) RCCF コンクリートにおいて、RCCF コンクリートの圧縮強度は各コンクリートを構成するモルタル部と同一の W/B と DSP の置換率におけるモルタルの圧縮強度と一次比例の関係となる。これより W/B と結合材の混合割合を選定することで RCCF コンクリートは本研究で目標とする設計基準強度(24N/mm<sup>2</sup>)以上を十分満足することが可能であった。
- (6) 圧縮強度の増加に伴い中性化速度係数は低減していることから、DSP-L を結合材に 60～80%用いた RCCF コンクリートにおいて、圧縮強度を高めることで、N コンクリートや BB コンクリートに対して同等以上の中性化抵抗性を付与できることが確認された。
- (7) 中性化に対する照査を行った結果、DSP-L を結合材に 80%用い、適切な W/B とす

ることで、耐用年数 65 年程度あれば、RCCF コンクリートにおいても所要の耐久性を満足する RC 造構造物を実現できるものと考えられる。

- (8) RCCF コンクリートの自由ひずみはN コンクリートに対して 100~200 $\mu$  程度大きく、乾燥収縮ひずみは同等であることから、このひずみ増大は乾燥開始前の自己収縮ひずみに起因すると想定される。

プレキャスト製造を想定した拘束ひび割れ試験を行った結果、内部鉄筋の拘束による収縮応力が材齢 150 日において、N コンクリートで 0.7N/mm<sup>2</sup>程度に対し、RCCF コンクリートでは 1.4N/mm<sup>2</sup>程度と大きくなったが、ひび割れ強度よりも小さく、ひび割れが生じていないことから、内部鉄筋の拘束によるプレキャスト部材のひび割れ抵抗性は確保できるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 荒井康夫：セメントの材料化学，大日本図書(株)，1998
- 2) 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）・同解説，丸善，2004
- 3) 日本コンクリート工学会：混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会，2010.9
- 4) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書（設計編），丸善，2015
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説，丸善，2006

# 第5章

---

## DSP の各種コンクリートへの有効利用

## 第5章 DSPの各種コンクリートへの有効利用

### 5.1 はじめに

本章では、DSPをOPCに対して20～30%置換した低環境負荷コンクリート（以下、L-SRコンクリートと称す）を開発し、レディーミクストコンクリート（生コン）およびプレキャストコンクリートに適用することを目的として、L-SRコンクリートのフレッシュ性状や圧縮強度および中性化速度係数について実験的検討を行った。また生コンにおいては、実機プラントによる現場実打設を行った。

一方、プレキャストコンクリートでは、OPCにDSPを20%置換して行い、DSPの種類による影響を明らかにすることを目的とし、DSPを用いたプレキャストコンクリート（以下、積みブロックコンクリートと称す）のフレッシュ、硬化性状および製品規格（外観・質量・形状、寸法・圧縮強度）との適合性について検討した。

### 5.2 DSPを用いたレディーミクストコンクリート（生コン）

#### 5.2.1 実験概要

##### (1) 室内試験の概要

実験の概要を表5.1に示す。実験要因は、水結合材比、結合材の構成割合、DSPの比表面積の3要因とし、表に示すNo.1～No.12（分類：室内試験①）の9水準にて、これらの要因がフレッシュ性状および圧縮強度に及ぼす影響を検討した。また表に示すNo.13～No.17（分類：室内試験②）の5水準にて、水結合材比の要因がフレッシュ性状および圧縮強度に及ぼす影響を検討した。さらに、配合No.13については、フレッシュ性状の経時変化についても検討した。

##### (2) 使用材料および配合

使用材料を表5.2に、コンクリートの配合表を表5.3に示す。室内試験①において、結合材はOPCを使用し、DSPは比表面積 $6760\text{cm}^2/\text{g}$ （記号：DSP-L①）および比表面積 $8820\text{cm}^2/\text{g}$ （記号：DSP-M）の2種類をB×20%、B×30%使用した。コンクリートの配合は、W/B=35、45、60%とし、比較対象としてOPC100%についても実施した。単位水量は $170\text{kg}/\text{m}^3$ 、粗骨材かさ容積は $0.56\text{m}^3/\text{m}^3$ 、目標空気量は4.5%、目標スランプは15cmとして配合を設定した。室内試験②において、結合材はOPC、DSPは比表面積 $7940\text{cm}^2/\text{g}$ （記号：DSP-L②）をB×20%使用した。コンクリートの配合は、W/B=40～60%とした。単位水量は、室内試験①の結果もふまえ $165\text{kg}/\text{m}^3$ 、目標スランプは15cm、目標空気量は4.5%として配合を設定した。

表 5.1 実験概要

分類	No	記号	W/B (%)	結合材の構成割合 (結合材質量×%)			室内試験						
				DSP-L	DSP-M	OPC	フレッシュ試験			圧縮強度試験			促進中性化試験 (中性化深さ)
							スランプ	空気量	コンクリート 温度	材齢 7日	材齢 28日	材齢 91日	1週、4週、8週、13 週、26週
							cm	%	℃	N/mm <sup>2</sup>			mm
室内試験 ①	1	35-DSP-L①20-OPC80	35	20	-	80	○	○	○	○	○	○	-
	2	45-DSP-L①20-OPC80	45	20	-	80	○	○	○	○	○	○	○
	3	60-DSP-L①20-OPC80	60	20	-	80	○	○	○	○	○	○	-
	4	35-DSP-L①30-OPC70	35	30	-	70	○	○	○	○	○	○	-
	5	45-DSP-L①30-OPC70	45	30	-	70	○	○	○	○	○	○	○
	6	60-DSP-L①30-OPC70	60	30	-	70	○	○	○	○	○	○	-
	7	35-DSP-M30-OPC70	35	-	30	70	○	○	○	○	○	○	-
	8	45-DSP-M30-OPC70	45	-	30	70	○	○	○	○	○	○	○
	9	60-DSP-M30-OPC70	60	-	30	70	○	○	○	○	○	○	-
	10	35-OPC100	35	-	-	100	○	○	○	○	○	○	-
	11	45-OPC100	45	-	-	100	○	○	○	○	○	○	○
	12	60-OPC100	60	-	-	100	○	○	○	○	○	○	-
室内試験 ②	13	60-DSP-L②20-OPC80	60	20	-	80	○*	○*	○	○	○	-	-
	14	55-DSP-L②20-OPC80	55	20	-	80	○	○	○	○	○	-	-
	15	50-DSP-L②20-OPC80	50	20	-	80	○	○	○	○	○	-	-
	16	45-DSP-L②20-OPC80	45	20	-	80	○	○	○	○	○	-	-
	17	40-DSP-L②20-OPC80	40	20	-	80	○	○	○	○	○	-	-

※は練り混ぜ直後、30分後、60分後で試験を実施した。

### (3) 試験方法

室内試験①では、練混ぜ量を35Lとし、60Lの2軸強制練りミキサを用いて練混ぜを行った。フレッシュコンクリートの試験として、スランプ(JIS A 1101)、空気量(JIS A 1128)、コンクリート温度(JIS A 1156)、単位容積質量(JIS A 1116)の各試験を行った。

圧縮強度試験用供試体として、1水準につきφ100×200mmの円柱供試体を9体作製した。打設直後から20℃封かん養生とし、材齢1日で脱型後、標準養生とした。材齢7、28、91日で圧縮強度試験(JIS A 1108)を行った。

表 5.2 使用材料

項目	記号	材 料	密度 g/cm <sup>3</sup>	比表面積 cm <sup>2</sup> /g	備 考
結合材	DSP-L①	乾燥スラッジ微粉末LB	2.86	6760	室内試験①
	DSP-L②		2.61	7940	室内試験②
	DSP-M	乾燥スラッジ微粉末MB	2.79	8820	室内試験①
	OPC	普通セメント	3.15	3250	-
細骨材	S1	石灰砕砂	2.67	-	-
	S2	山砂	2.58	-	-
粗骨材	G	石灰砕石	2.69	-	-
混和剤	SP	高性能AE減水剤	-	-	-
	AE	AE剤	-	-	-
	DF	消泡剤	-	-	-

表 5.3 配合表

分類	No	配合	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							混和剤添加率 (B × wt%)	
					OPC	DSP-L	DSP-M	W	S1	S2	G	SP	AE
室内試験①	1	35-DSP-L①20-OPC80	35	44.1	389	97	-	170	406	332	934	1.05%	0.21%
	2	45-DSP-L①20-OPC80	45	47.0	302	76	-	170	456	373	934	0.80%	0.22%
	3	60-DSP-L①20-OPC80	60	49.3	227	57	-	170	500	409	934	0.85%	0.21%
	4	35-DSP-L①30-OPC70	35	44.0	340	146	-	170	403	330	934	1.10%	0.20%
	5	45-DSP-L①30-OPC70	45	46.9	264	113	-	170	454	372	934	0.90%	0.22%
	6	60-DSP-L①30-OPC70	60	49.3	198	85	-	170	499	408	934	1.00%	0.21%
	7	35-DSP-M30-OPC70	35	43.9	340	-	146	170	402	329	934	1.40%	1.00%
	8	45-DSP-M30-OPC70	45	46.9	264	-	113	170	453	371	934	1.15%	0.18%
	9	60-DSP-M30-OPC70	60	49.2	198	-	85	170	498	407	934	0.70%	0.18%
	10	35-OPC100	35	44.4	486	-	-	170	410	336	934	0.65%	0.25%
	11	45-OPC100	45	47.2	378	-	-	170	460	376	934	0.60%	0.25%
	12	60-OPC100	60	49.5	283	-	-	170	503	412	934	0.55%	0.10%
室内試験②	13	60-DSP-L②20-OPC80	60	48.9	218	57	-	165	494	405	960	0.85%	0.50%
	14	55-DSP-L②20-OPC80	55	48.3	240	60	-	165	483	395	960	0.85%	0.50%
	15	50-DSP-L②20-OPC80	50	47.1	264	66	-	165	460	376	976	0.90%	0.50%
	16	45-DSP-L②20-OPC80	45	44.4	294	73	-	165	430	351	1001	0.95%	0.55%
	17	40-DSP-L②20-OPC80	40	41.7	330	83	-	165	393	322	1025	1.35%	0.70%

配合 No.2, 5, 8, 11 については、促進中性化試験を行った。1 水準につき 100×100×400mm の試験体を 2 体作製した。促進中性化試験は、JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験方法に準拠した。材齢 3 日で脱型し、材齢 28 日まで標準養生、材齢 56 日まで室温 20℃、湿度 60%RH 気乾養生、材齢 56 日から 20℃60%RH、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)濃度 5%の促進条件とした。促進材齢 7 日、28 日、56 日、91 日、182 日において、中性化深さを測定した。

室内試験②では、室内試験①と同様にフレッシュ試験を行った。また配合 No.13 については、練混ぜから 30 分後、60 分後におけるスランプおよび空気量試験を実施した。

圧縮強度試験については、室内試験①と同様に行い、材齢 7 日、28 日について実施した。

## 5.2.2 実験結果および考察

### (1) フレッシュ性状

室内試験①におけるスランプ試験の結果を図 5.1 に、空気量試験の結果を図 5.2 に示す。図より、スランプ、空気量ともに混和剤で調整することにより、おおむね目標範囲内（スランプ 15±2.5cm、空気量 4.5±1.5%）となった。混和剤の添加率について、W/B と SP 添加率の関係を図 5.3 に示す。図より W/B が大きいほど、SP 添加率は小さくなる傾向であった。また DSP の種類では、DSP-L の方が DSP-M よりも SP 添加率が小さくなり、DSP 置換率が小さいほど、SP 添加率は小さくなった。これらは、DSP の比表面積が SP 添加率に影響したものと考えられる。

室内試験②における W/B と SP 添加率の関係を図 5.4 に示す。室内試験①と同様に W/B が大きくなるほど、SP 添加率は小さくなった。また室内試験①および②において、W/B が小さい領域では、SP 添加率は大きくなり、コンクリートの練り上がりの状態もかなり粘性が高い高強度コンクリートのような状態となるため、W/B が小さい配合で L-SR コンクリートは適用が困難であることが予想された。

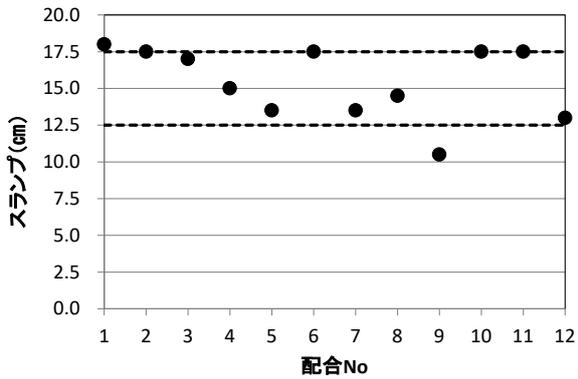


図 5.1 スランプ試験結果

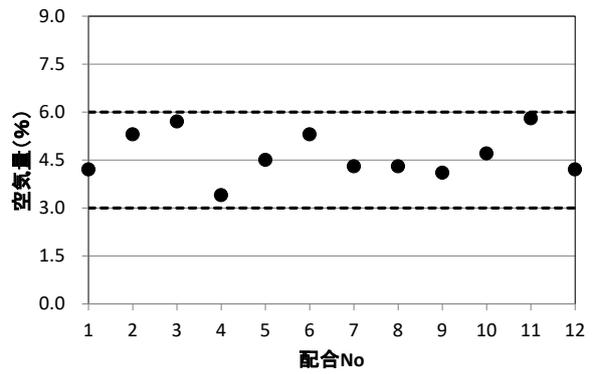


図 5.2 空気量試験結果

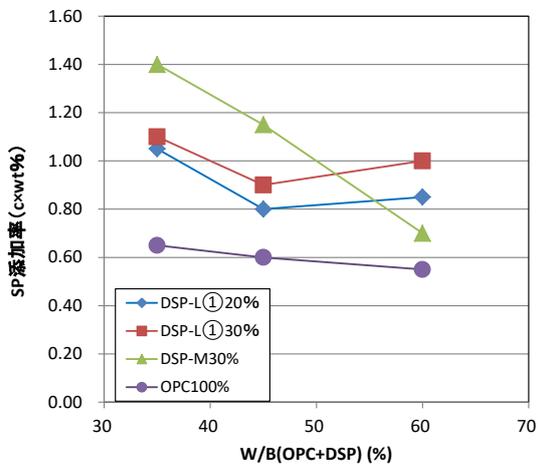


図 5.3 W/B と SP 添加率の関係

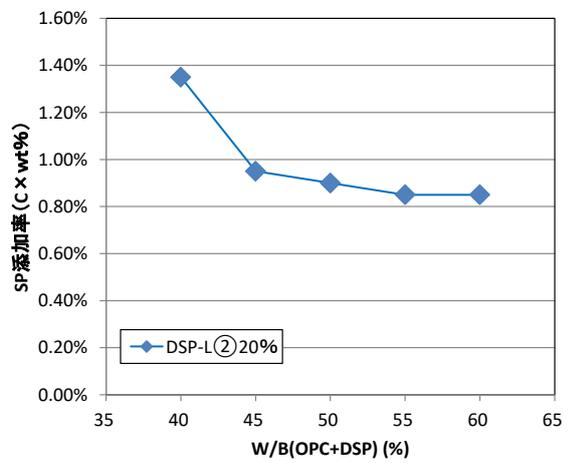


図 5.4 W/B と SP 添加率の関係

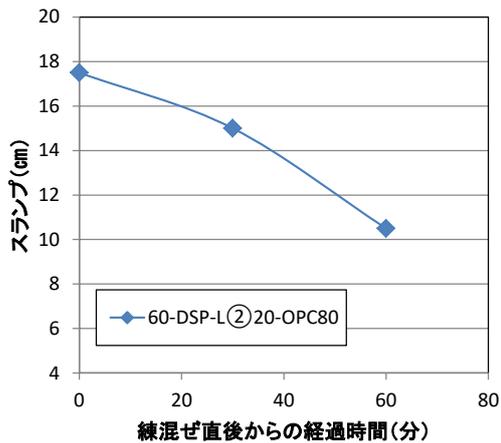


図 5.5 スランプ経時試験

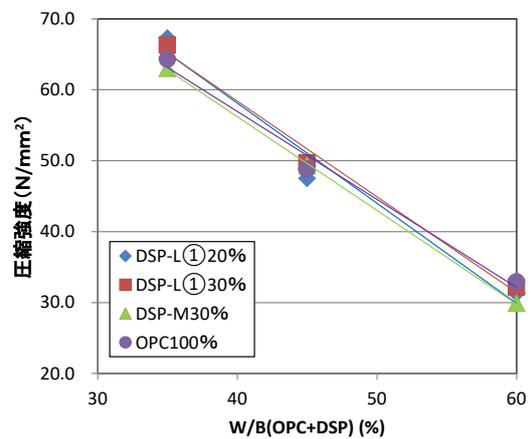


図 5.6 W/B と圧縮強度 (材齢 28 日)

スランプの経時変化を図 5.5 に示す。図より経過時間が大きくなるにつれてスランプが小さくなった。参考文献 1) より、同一配合条件ではないものの OPC を用いたコンクリートと比べ、L-SR コンクリートのスランプロスと同程度となった。

## (2) 圧縮強度

室内試験①において、W/B と圧縮強度（材齢 28 日）の関係を図 5.6 に示す。図より全ての配合で W/B が大きくなるほど、強度が小さくなった。DSP の種類においては、DSP-L が DSP-M より若干強度が大きくなった。DSP 置換率では、20%と 30%で大きな差は見られなかった。また、OPC を用いたコンクリートと比較すると、ほぼ同程度の強度が得られた。これらは、DSP の未水和セメントの残存量が強度発現に寄与し、これまでの検討で DSP-L は未水和セメントの残存量が多く、DSP-M は未水和セメントの残存量が少ないことが影響したものと思われる。

室内試験②において、W/B と圧縮強度（材齢 28 日）の関係を図 5.7 に示す。図より W/B が大きくなるほど、強度は小さくなり、W/B と強度には高い相関関係が見られた。

## (3) 中性化速度係数

DSP 置換率と中性化速度係数の関係を図 5.8 に示す。図より OPC を用いたコンクリートに比べ、L-SR コンクリートは中性化速度係数が大きくなった。DSP の種類では、DSP-L の方が DSP-M に比べ、中性化速度係数は小さくなった。また DSP 置換率では 20%の方が大きくなった。これらは、L-SR コンクリートの W/B を小さくすることにより、OPC を用いたコンクリートの中性化速度係数と同程度の中性化速度係数とすることができると考えられる。

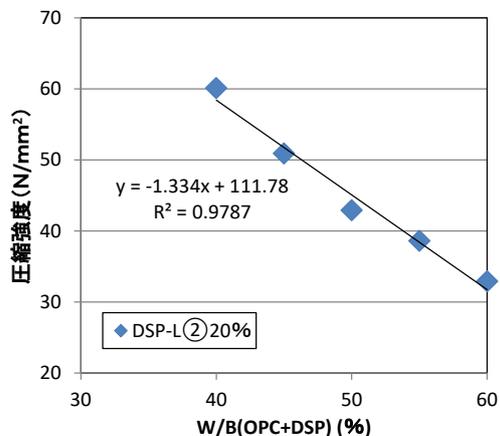


図 5.7 W/B と圧縮強度（材齢 28 日）

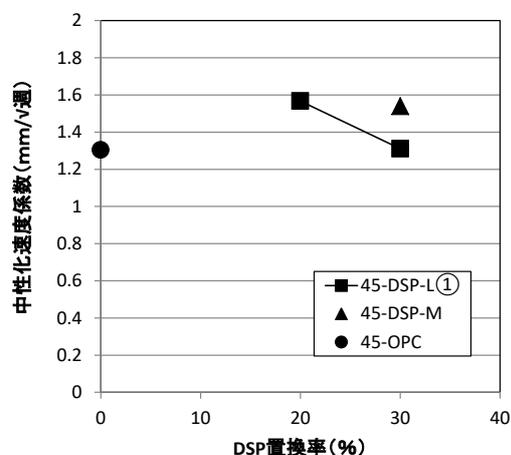


図 5.8 DSP 置換率と中性化速度係数

## 5.2.3 現場実打設

### (1) 使用材料および配合

使用材料を表 5.4 に、配合表を表 5.5 に示す。表より使用材料は、レミコン工場で使用するものを、DSP は比表面積  $6540\text{cm}^2/\text{g}$  を用い、セメントサイロに投入して行った。配合は 18-15-20 であった。なおこれまでの室内試験結果から単位水量、細骨材率を選定した<sup>2)</sup>。

表 5.4 使用材料

項目	記号	材 料	密度 g/cm <sup>3</sup>	比表面積 cm <sup>2</sup> /g
結合材	DSP	乾燥スラッジ微粉末	2.87	6540
	OPC	普通セメント	3.15	3250
細骨材	S1	石灰砕砂	2.67	-
	S2	山砂	2.58	-
粗骨材	G	石灰砕石	2.69	-
混和剤	SP	高性能AE減水剤	-	-
	AE	AE剤	-	-
	DF	消泡剤	-	-

表 5.5 配合表

配合	W/B (%)	s/a (%)	単用量(kg/m <sup>3</sup> )					
			OPC	DSP	W	S1	S2	G
60-DSP20-OPC80	60	48.9	220	55	165	494	405	960

## (2) 実験方法

本実験では、レミコン工場で製造した L-SR コンクリートを工場出荷時と、現場荷卸時にそれぞれスランブ試験(JIS A 1101), 空気量試験(JIS A 1128)を実施した。目標スランブは 15 ± 2.5cm, 目標空気量は 4.5 ± 1.5%とした。また現場で採取した供試体から圧縮強度試験(JIS A 1108)を行った。なお供試体は翌日脱型とし試験材齢まで 20 ± 2°C で水中養生した。

## (3) 現場概要

今回、L-SR コンクリートの打設を行った A 現場は神奈川県内に立地する。レミコン工場からの運搬時間は 30 分前後（運搬距離 7~8km 程度）であり、仮設部材に適用した。L-SR コンクリートを 3 日（実施日：10 月 19 日, 11 月 16 日, 12 月 2 日）で 140m<sup>3</sup>打設した。

## 5.2.4 実験結果および考察

### (1) フレッシュ性状

スランブ試験結果を図 5.9 に示す。図の経過時間 0 分は工場出荷時のものであり、経過時間 20~50 分の値は現場荷卸時のものである。図より全ての配合で目標範囲内となった。工場出荷時-現場荷卸時のスランブロス、平均で約 4cm（最大値：6cm, 最小値：1cm）であり、12 月 2 日に打設したスランブのロスは小さくなった。これは気温が影響したものと考えられる。また OPC のみを用いたコンクリートに比べ、スランブロスは若干大きくなった。

各打設日における混和剤添加率を表 5.6 に示す。表より 10 月 19 日の SP 添加率が大きくなった。これは気温が影響したものと考えられるが、今後さらに実績を重ね、打設時期の違う L-SR コンクリートの混和剤添加率等を把握する必要がある。

空気量試験結果を図 5.10 に示す。図より全ての配合において目標範囲内となった。空気

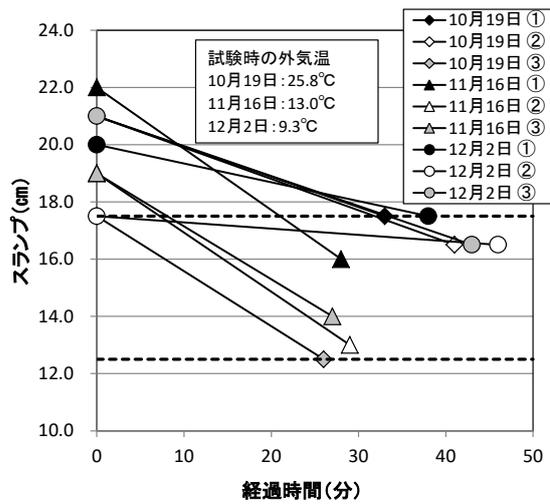


図 5.9 スランプ試験結果

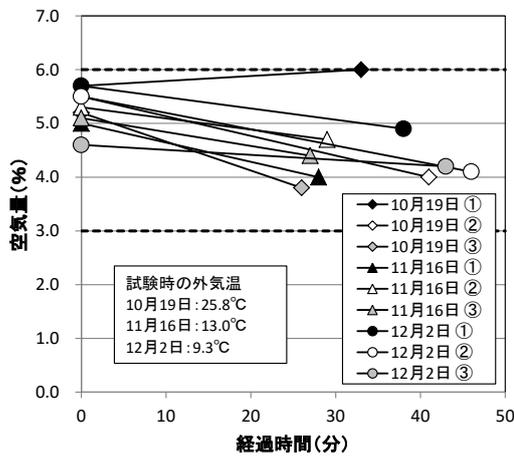


図 5.10 空気量試験結果

表 5.6 混和剤添加率

打設日	SP添加率 (B × wt%)	AE添加率 (B × wt%)
10月19日	1.15	1.05
11月16日	0.90	0.90
12月2日	0.90	0.90

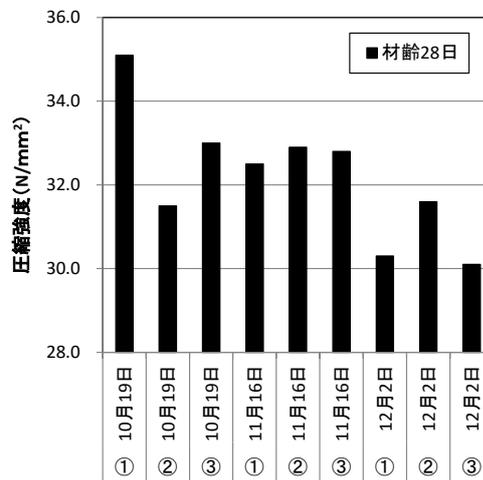


図 5.11 圧縮強度試験結果

量のロスは平均で約 1.0%（最大値：1.5%，最小値：-0.3%）であり，OPC のみを用いたコンクリートと同程度であると考えられる。

## (2) 圧縮強度

材齢 28 日の圧縮強度試験結果を図 5.11 に示す。図より圧縮強度は，平均で  $32.2\text{N/mm}^2$ （最大値： $35.1\text{N/mm}^2$ ，最小値： $30.1\text{N/mm}^2$ ）であり，OPC のみを用いたコンクリートに比べ，若干小さくなった。

### 5.3 DSP を用いたプレキャストコンクリート



写真 5.1 積みブロックコンクリート



写真 5.2 施工例

#### 5.3.1 積みブロックコンクリートの製造方法

積みブロックコンクリートの製造方法を図 5.12 に示す。実機プラントにて混練後振動締固めを行い、その後即時脱型し、蒸気養生槽へ送りこみ、養生終了後ストック場にて保管する。積みブロックコンクリートの形状、寸法を図 5.13 に示す。また蒸気養生パターンを図 5.14 に示す。

#### 5.3.2 実験概要

##### (1) 使用材料および配合

使用材料を表 5.7 に示す。DSP は比表面積が異なる 3 種類を用いた。混和剤は可塑剤(Ad1)と即脱用(Ad2)の 2 種類を用いたが、どちらも充填性を向上させるが、即脱用(Ad2)には空気

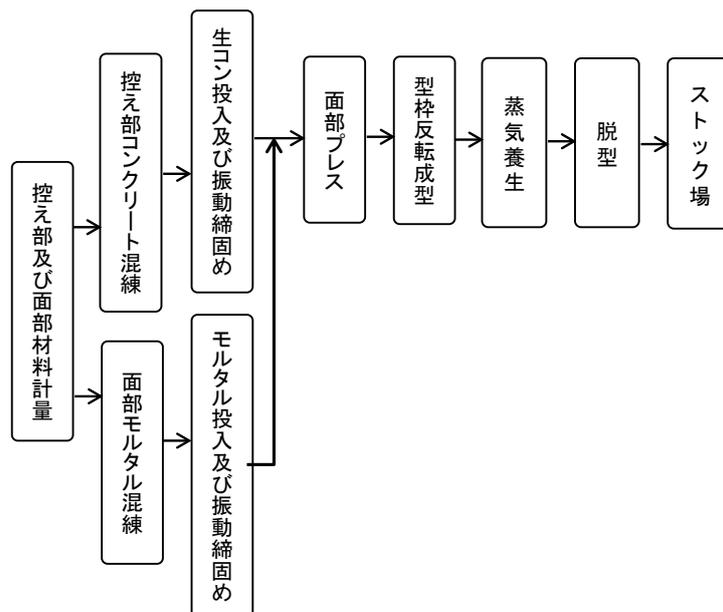


図 5.12 積みブロックコンクリートの製造方法

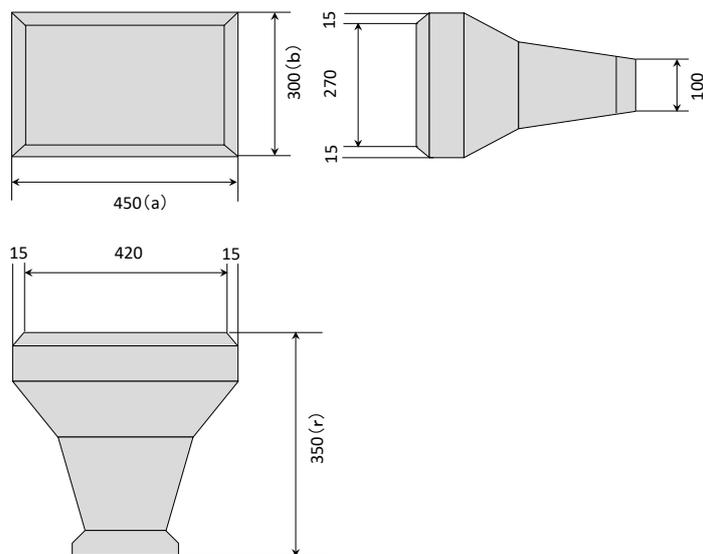


図 5.13 積みブロックコンクリートの形状・寸法

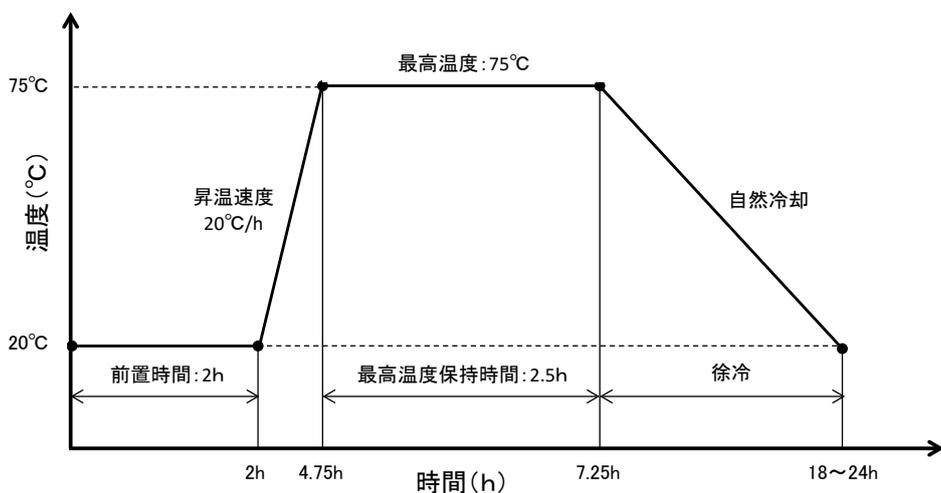


図 5.14 蒸気養生パターン

連行性の機能がある。配合表を表 5.8 に示す。DSP 置換率は 20%一定とした。なお、比較対象として、OPC のみを用いたものも行った。

## (2) フレッシュおよび硬化性状

フレッシュ性状は、振動締固め成型直後の半製品表面に程よく水分の照りがある状態で形状を保ち、ダレおよびジャンカがないことを目視により確認した。硬化性状に関する試験は、コンクリートからのコアの採取方法および圧縮強度試験方法 (JIS A 1107) に準拠して行った。圧縮強度試験は、材齢 7 日および 14 日で行い、コア採取は試験材齢の 2 日前に行い、採取したコア供試体を試験時まで  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  の水中養生後に圧縮強度試験を行った。またコア供試体の見掛けの密度は上記試験方法に準拠して行った。

表 5.7 使用材料

種類	記号	材料名	密度 g/cm <sup>3</sup>	比表面積 cm <sup>2</sup> /g	吸水率 %
結合材	OPC	普通ポルトランドセメント	3.16	3330	-
	DSP-L	低ブレン品乾燥スラッジ微粉末	2.86	6780	-
	DSP-M	中ブレン品乾燥スラッジ微粉末	2.79	8820	-
	DSP-H	高ブレン品乾燥スラッジ微粉末	2.58	9950	-
細骨材	S	砕砂(神奈川県相模原産)	2.61(表乾)	-	
粗骨材	G	砕石(神奈川県厚木産)	2.61(表乾)	-	2.77
混和剤	Ad1	可塑剤	1.01	-	-
	Ad2	即脱用(空気連行型)	1.05	-	-

表 5.8 コンクリートの配合

No	配合名	W/B %	s/a %	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
				W	OPC	DSP	S	G	Ad1 Ad2 (B×wt%)	
1	40.2-OPC100-Ad1-0.18	40.2	60.7	102	255	0	1214	787	0.18	-
2	40.2-OPC80-DSP-L20-Ad2-0	40.2	60.0	108	216	54	1182	787	-	0.00
3	40.2-OPC80-DSP-L20-Ad2-0.15	40.2	60.0	108	216	54	1182	787	-	0.15
4	39.3-OPC80-DSP-M20-Ad2-0.15	39.3	59.5	108	220	55	1168	795	-	0.15
5	39.3-OPC80-DSP-H20-Ad2-0.15	39.3	59.5	108	220	55	1165	795	-	0.15

表 5.9 積みブロックコンクリートの規格値

項目	規格値		
外観	使用上有害な、きず、ひび割れ、 欠け、反りなどがあってはならない		
質量	1m <sup>3</sup> 当りのブロック質量350kg以上 1個当たり47.3kg以上		
形状、寸法	幅(a)	450mm	±3mm
	高さ(b)	300mm	±3mm
	控長(r)	350mm	±5mm
性能(圧縮強度)	材齢14日で18N/mm <sup>2</sup> 以上 (製品と同一養生)		

### (3) 製品規格との適合性

積みブロックコンクリートの規格値を表 5.9 に示す。表より目標圧縮強度は材齢 14 日で 18N/mm<sup>2</sup>以上である。それぞれ積みブロックコンクリートの外観・質量・形状、寸法、圧縮強度を測定し、規格値との適合性を確認した。なお製品における外観は、使用上有害なきず、ひび割れ、欠け、反りなどが無いことを目視により確認した。

### 5.3.3 実験結果および考察

#### (1) 積みブロックコンクリートのフレッシュ性状

振動締め成型直後の半製品の状態を目視により確認した。DSP を用いたものは、OPC を用いたものと同程度であり、ダレおよびジャンカも見られなかった。

## (2) 積みブロックコンクリートの硬化性状

積みブロックコンクリートの圧縮強度試験結果を図 5.15 に示す。図より DSP を用いたいずれの配合も材齢 14 日に 18N/mm<sup>2</sup>以上となった。

DSP の比表面積と材齢 14 日圧縮強度の関係を図 5.16 に示す。図より DSP 比表面積が大きくなるほど圧縮強度が小さくなった。これは既往の研究より、DSP の比表面積が大きくなるほど、未水和セメントの残存量が少なくなるため、強度発現が小さくなったものと考えられる。

材齢 14 日と材齢 7 日の圧縮強度比を図 5.17 に示す。図より OPC を用いた積みブロックコンクリートと DSP を用いたものではほぼ同程度の強度比であった。

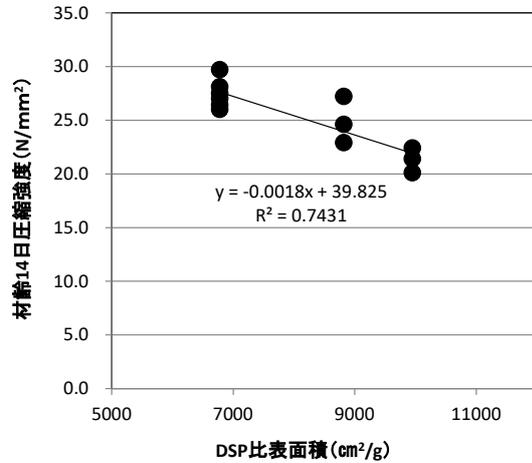
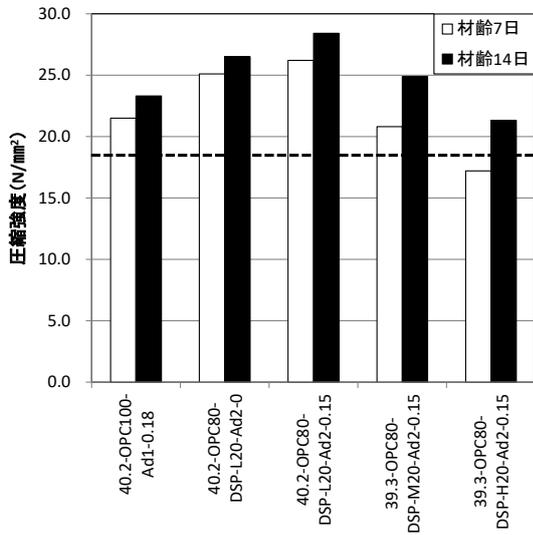


図 5.16 DSP 比表面積と材齢 14 日圧縮強度

図 5.15 圧縮強度試験結果

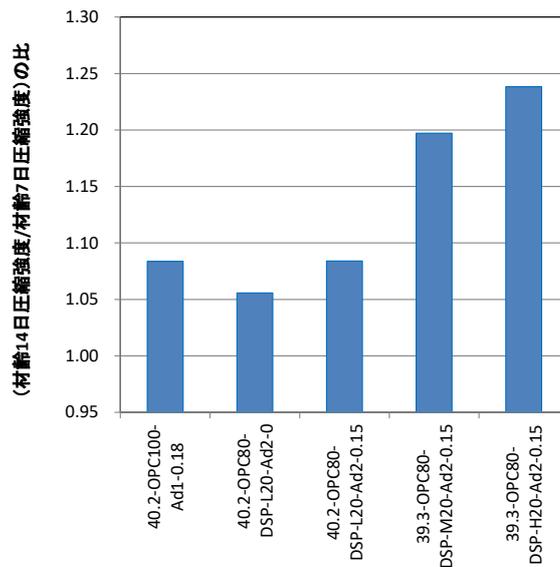


図 5.17 (材齢 14 日/材齢 7 日) の圧縮強度

### (3) 積みブロックコンクリートの製品検査

積みブロックコンクリートの製品検査結果一覧表を表 5.10 に示す。表より、製品質量に関しては、DSP-H を用いたもので規格値より小さくなった。これは、DSP の比表面積が大きくなるほど、密度が小さくなることから、製品質量が小さくなったと考えられる。それ以外では全て規格値を満足した。

コア供試体の見掛け密度と材齢 14 日圧縮強度の関係を図 5.18 に示す。図より OPC 配合（配合 No.1）および DSP 配合（配合 No.2～5）ともにコア供試体の見掛け密度が大きくなるほど、圧縮強度は大きくなり、相関関係が見られた。また DSP 配合と OPC 配合はほぼ同様の傾向であった。これは積みブロックコンクリートの見掛け密度が大きくなると空隙率が小さくなり、組織が緻密化されたことによって圧縮強度が大きくなったためであると考えられる。

コア供試体の見掛け密度と製品質量の関係を図 5.19 に示す。図は DSP 配合のみを示した。

表 5.10 製品検査結果一覧表（外観・製品質量）

No	配合	外観	判定	製品質量 47.3以上 kg	判定
1	40.2-OPC100-Ad1-0.18	良好	○	48.6	○
		良好	○	48.7	○
		良好	○	48.6	○
2	40.2-OPC80-DSP-L20-Ad2-0	良好	○	48.0	○
		良好	○	48.2	○
		良好	○	48.2	○
3	40.2-OPC80-DSP-L20-Ad2-0.15	良好	○	48.4	○
		良好	○	48.4	○
		良好	○	48.3	○
4	39.3-OPC80-DSP-M20-Ad2-0.15	良好	○	47.3	○
		良好	○	48.0	○
		良好	○	47.5	○
5	39.3-OPC80-DSP-H20-Ad2-0.15	良好	○	47.2	×
		良好	○	47.0	×
		良好	○	46.6	×

表 5.11 製品検査結果一覧表（形状寸法・圧縮強度・コア供試体の見掛け密度）

No	配合	形状寸法			判定	圧縮強度 材齢14日 18以上 N/mm <sup>2</sup>	判定	コア供試体 の見掛け 密度 g/cm <sup>3</sup>
		幅	高さ	控長				
		450±3	300±3	350±5				
1	40.2-OPC100-Ad1-0.18	449	300	355	○	22.7	○	2242
		449	300	354	○	23.4	○	2223
		449	300	354	○	23.9	○	2223
2	40.2-OPC80-DSP-L20-Ad2-0	450	300	350	○	26.4	○	2255
		450	301	351	○	26.0	○	2243
		449	300	351	○	27.0	○	2265
3	40.2-OPC80-DSP-L20-Ad2-0.15	451	300	347	○	28.1	○	2271
		451	301	345	○	29.7	○	2276
		450	301	346	○	27.5	○	2261
4	39.3-OPC80-DSP-M20-Ad2-0.15	449	300	347	○	22.9	○	2216
		450	299	348	○	27.2	○	2216
		449	300	349	○	24.6	○	2209
5	39.3-OPC80-DSP-H20-Ad2-0.15	450	300	349	○	22.4	○	2179
		449	299	347	○	20.1	○	2171
		450	300	350	○	21.4	○	2179

図よりコア供試体の見掛け密度が大きくなると、製品質量も大きくなり、相関関係が見られた。

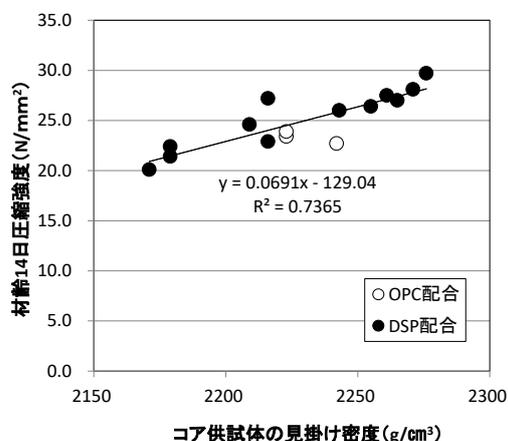


図 5.18 コア供試体の見掛け密度と材齢 14 日圧縮強度

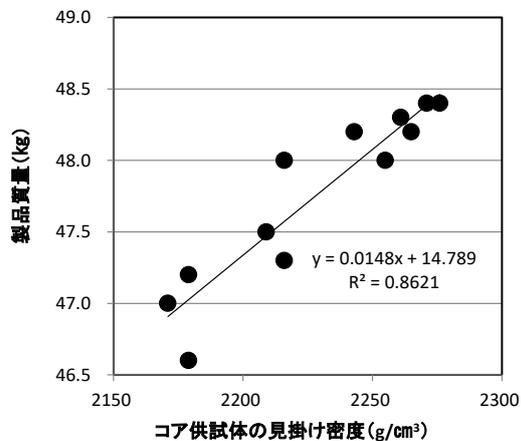


図 5.19 見掛け密度と製品質量

## 5.4 まとめ

- (1) 室内試験において、L-SR コンクリートのフレッシュ性状は、W/B が大きいほど、SP 添加率は小さくなる傾向であった。また DSP の種類では、DSP-L の方が DSP-M よりも SP 添加率が小さくなり、DSP 置換率が小さいほど、SP 添加率は小さくなった。
- (2) 室内試験において、L-SR コンクリートの圧縮強度は、W/B が大きくなるほど、強度が小さくなった。DSP の種類においては、DSP-L が DSP-M より若干強度が大きくなった。DSP 置換率では、20%と 30%で大きな差は見られなかった。
- (3) 室内試験において、L-SR コンクリートの中酸化速度係数は、OPC を用いたコンクリートに比べ、L-SR コンクリートは中酸化速度係数が大きくなった。DSP の種類では、DSP-L の方が DSP-M に比べ、中酸化速度係数は小さくなった。また DSP 置換率では 20%の方が若干小さくなった。
- (4) 実機プラントにおける現場実打設において、L-SR コンクリートのフレッシュ性状は、スランプおよび空気量とも目標範囲内となったが、スランプロスが若干大きくなる結果となった。
- (5) 実機プラントにおける現場実打設において、L-SR コンクリートの圧縮強度は、OPC のみを用いたコンクリートに比べ、若干小さくなるが、おおむね良好であった。
- (6) DSP を用いた積みブロックコンクリートのフレッシュ性状は、OPC を用いたものと同程度であり、ダレおよびジャンカも見られなかった。

- (7) 積みブロックコンクリートの硬化性状は、DSP を用いたいずれの配合でも目標強度以上得られた。
- (8) 積みブロックコンクリートの材齢 14 日と材齢 7 日の圧縮強度比は OPC を用いたものとはほぼ同程度の強度比となった。
- (9) コア供試体の見掛け密度が大きくなるほど、材齢 14 日圧縮強度は大きくなり、相関関係が見られた。また DSP を用いた積みブロックコンクリートは、OPC を用いたものと同様の傾向となった。
- (10) DSP-H を用いた配合は、製品質量のみ規格値を満たさなかったが、配合修正を行うことで、DSP-H を用いたものでも全ての規格値を満足できる積みブロックコンクリートが製造できるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 高橋直也，鈴木翔太，馬場勇介，笠井哲郎：貧配合コンクリートのスランプロス発生機構とその低減方法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1183-1188，2013.7

# 第 6 章

---

結論

## 第6章 結論

### 6.1 本論文のまとめ

本研究では戻りコンから骨材を回収し、残余のスラッジ水を脱水後、破碎乾燥処理した乾燥スラッジ微粉末（以下、DSP と称す）についてその基礎物性を明らかにし、DSP を有効利用するため、コンクリート分野への適用について検討した。

以下に、本研究で得られた成果を総括して、本論文の結論とする。

第1章では、本研究の背景、研究の目的および本論文の構成を示した。

第2章では、戻りコンの国内および海外の状況および戻りコンに関連する JIS 規定の現状について整理した。また戻りコンの有効利用や環境負荷低減型コンクリートに関する既往の研究についても調査した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 国内における戻りコンの現状では、戻りコンから回収したスラッジ水、回収骨材は普及が進んでいない。またそれ以外の有効利用についても普及が進んでおらず、ほとんどが廃棄処理されている。
- (2) 海外における戻りコンの現状では、米国や欧州では化学処理剤を用いた戻りコンの有効利用の取組が行われている。一方で韓国や中国では、生コンは建設現場でできるだけ消費されるため戻りコン量が少なく、回収水、回収骨材の利用が進んでいるため、戻りコン処理が大きな問題とはなっていない。
- (3) 戻りコンの有効利用に関する既往の研究では、乾燥スラッジの反応性と、風力粉碎機で丸みを帯びた微粉碎乾燥スラッジを製造し、高流動コンクリートに10%程度まで使用可能であることが報告されており、本研究の乾燥スラッジ微粉末は処理までの時間を短縮し、未水和セメント分を多く残すことを特徴とし、基礎物性の解明や品質向上または生コンに20~30%まで使用できることを示し、実機への適用を新たに行っている。
- (4) 環境負荷低減型コンクリートに関する既往の研究では、ジオポリマーコンクリートおよび環境負荷低減型コンクリートは中性化抵抗性が低下することが報告されている。

第3章では、DSP の品質に処理方法が大きく影響することが想定されるため、その品質管理手法を確立することを目的とし、DSP の基礎物性および実機プラントを用いた DSP の製造実験を実施した。さらに夏季における DSP の品質向上を目的に遅延剤添加の効果および DSP の品質に及ぼす分級や粉碎の影響について検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) DSP の密度，強熱減量および比表面積と平均外気温には高い相関関係が認められた。
- (2) DSP の粒度分布は，30 $\mu\text{m}$  程度のピークの他に 300 $\mu\text{m}$  程度の頻度も高く 2 山状の粒度分布であることが確認された。
- (3) DSP の SEM 画像では，未水和セメント，細骨材の微粒分の一部および水和生成物の凝集したものが含まれていることが観察された。
- (4) DSP の未水和セメントの割合は 0.6~0.8 であり，DSP の比表面積が大きくなるに従い未水和セメント量が減少する傾向が認められた。
- (5) DSP に含まれる微砂分量は ZKT 法で 5~10%程度，グルコン酸法では，20~40%程度であった。
- (6) DSP の六価クロム溶出量は，OPC や BB と比べ大幅に小さい値となった。
- (7) 実機プラントによる DSP の製造実験では，積算温度と DSP の比表面積には夏季および冬季において，おおむね相関関係が見られた。また夏季に遅延剤を添加することにより，同一積算温度で DSP の比表面積が小さくなった。このことから，DSP の品質管理はこの積算温度と比表面積で行うことができることを新たに見出した。
- (8) 遅延剤を用いた DSP の品質向上手法においては，強度発現性，水和発熱特性および凝結特性の全てにおいて遅延剤添加による品質向上効果が確認された。
- (9) 100 $\mu\text{m}$  で分級した DSP は，100 $\mu\text{m}$  超の粒子に水和生成物等が凝集したものが多く含まれており，その凝集したのものにも未水和セメントが含まれていることが観察された。
- (10) 分級した DSP を用いたモルタルのフレッシュ性状は，100 $\mu\text{m}$  超のものが同一程度のフレッシュ性状を得るのに必要な SP 添加率が大きくなり，100 $\mu\text{m}$  以下は分級前と同程度であった。また，モルタルの圧縮強度は，ほぼ同程度であった。
- (11) 粉砕した DSP を用いたモルタルのフレッシュ性状は，粉砕前に比べ，同一程度のフレッシュ性状を得るのに必要な SP 添加率は小さくなった。また，モルタルの圧縮強度は若干の低下が見られた。

第 4 章では，DSP を用いたクリンカーフリーコンクリートについて検討した。ここではクリンカーフリーコンクリートの基礎物性や耐久性に着目し，中性化抵抗性およびひび割れ抵抗性について検討した。その結果，以下の結論が得られた。

- (1) DSP と BFS において RCCF モルタルのフレッシュ性状は，普通モルタルに比べ，混和剤添加率が大きくなり，DSP 比表面積が大きくなるほど，混和剤添加率が大きくなった。硬化性状は，普通モルタルに比べ，同程度の強度が得られ，収縮ひずみは大きくなり，中性化速度係数は大きくなった。中性化速度係数は強度レベルを高くすることにより，同程度の中性化抵抗性が付与できることがわかった。
- (2) DSP と FA において RCCF モルタルのフレッシュ性状は普通モルタルに比べ，混和剤添加率が大きくなり，DSP 比表面積が大きくなるほど，混和剤添加率が大きくなった。硬化性状は，普通モルタルに比べ，上記(1)よりも強度低下が見られ，収縮ひずみは大

きくなり、中性化速度係数は大きくなった。中性化速度係数は強度レベルを高くすることにより、同程度の中性化抵抗性が付与できることがわかった。また標準養生と蒸気養生の違いは特に見られなかった。

- (3) DSP と BFS と FA において RCCF モルタルのフレッシュ性状は普通モルタルに比べ、混和剤添加率が大きくなり、FA や H を置換することにより、混和剤添加率は小さくなった。また 15 打フローの経時変化と凝結試験から、RCCF モルタルはフローロスが大きく、始発が早いことが判明した。硬化性状は、普通モルタルに比べ、強度低下が見られ、収縮ひずみは大きくなり、中性化速度係数は大きくなった。しかし少量の H を用いることで、強度、収縮ひずみおよび中性化抵抗性を向上させることができた。
- (4) 中性化予測では、屋外の環境条件(CO<sub>2</sub>濃度：0.05%) で計画供用期間を 65 年とした場合でも RCCF モルタルは普通モルタル(記号:60-N100)に比べ、適切な調合選定により、中性化深さが小さくなり、一般 RC 構造物にも十分適用可能であることが示唆された。
- (5) RCCF コンクリートにおいて、RCCF コンクリートの圧縮強度は各コンクリートを構成するモルタル部と同一の W/B と DSP の置換率におけるモルタルの圧縮強度と一次比例の関係となる。これより W/B と結合材の混合割合を選定することで RCCF コンクリートは本研究で目標とする設計基準強度(24N/mm<sup>2</sup>)以上を十分満足することが可能であった。
- (6) 圧縮強度の増加に伴い中性化速度係数は低減していることから、DSP-L を結合材に 60～80%用いた RCCF コンクリートにおいて、圧縮強度を高めることで、N コンクリートや BB コンクリートに対して同等以上の中性化抵抗性を付与できることが確認された。
- (7) 中性化に対する照査を行った結果、DSP-L を結合材に 80%用い、適切な W/B とすることで、耐用年数 65 年程度あれば、RCCF コンクリートにおいても所要の耐久性を満足する RC 造構造物を実現できるものと考えられる。
- (8) RCCF コンクリートの自由ひずみは N コンクリートに対して 100～200 $\mu$  程度大きく、乾燥収縮ひずみは同等であることから、このひずみ増大は乾燥開始前の自己収縮ひずみに起因すると想定される。

第 5 章では、DSP の各種コンクリートへの有効利用として、レディーミクストコンクリート(生コン)とプレキャストコンクリートについて検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 室内試験において、L-SR コンクリートのフレッシュ性状は、W/B が大きいほど、SP 添加率は小さくなる傾向であった。また DSP の種類では、DSP-L の方が DSP-M よりも SP 添加率が小さくなり、DSP 置換率が小さいほど、SP 添加率は小さくなった。
- (2) 室内試験において、L-SR コンクリートの圧縮強度は、W/B が大きくなるほど、強度が小さくなった。DSP の種類においては、DSP-L が DSP-M より若干強度が大きくなった。

DSP 置換率では、20%と30%で大きな差は見られなかった。

- (3) 室内試験において、L-SR コンクリートの中性化速度係数は、OPC を用いたコンクリートに比べ、L-SR コンクリートは中性化速度係数が大きくなった。DSP の種類では、DSP-L の方が DSP-M に比べ、中性化速度係数は小さくなった。また DSP 置換率では20%の方が若干小さくなった。
- (4) 実機プラントにおける現場実打設において、L-SR コンクリートのフレッシュ性状は、スランプおよび空気量とも目標範囲内となったが、スランプロスが若干大きくなる結果となった。
- (5) 実機プラントにおける現場実打設において、L-SR コンクリートの圧縮強度は、OPC のみを用いたコンクリートに比べ、若干小さくなるが、おおむね良好であった。
- (6) DSP を用いた積みブロックコンクリートのフレッシュ性状は、OPC を用いたものと同程度であり、ダレおよびジャンカも見られなかった。
- (7) 積みブロックコンクリートの硬化性状は、DSP を用いたいずれの配合でも目標強度以上得られた。
- (8) 積みブロックコンクリートの材齢14日と材齢7日の圧縮強度比はOPCを用いたものと同程度の強度比となった。
- (9) コア供試体の見掛け密度が大きくなるほど、材齢14日圧縮強度は大きくなり、相関関係が見られた。また DSP を用いた積みブロックコンクリートは、OPC を用いたものと同様の傾向となった。
- (10) DSP-H を用いた配合は、製品質量のみ規格値を満たさなかったが、配合修正を行うことで、DSP-H を用いたものでも全ての規格値を満足できる積みブロックコンクリートが製造できるものと考えられる。

## 6.2 本研究に関する今後の課題

本研究では戻りコンから骨材を回収し、残余のスラッジ水を脱水後、破碎乾燥処理した DSP についてその基礎物性を明らかにし、DSP を有効利用するため、コンクリート分野での適用について検討し、それぞれで有効利用できることが示唆された。今後この研究を基に実務での利用を進めていく必要がある。各研究の今後の課題を以下に示す。

- 1) DSP の品質管理手法は積算温度と比表面積から管理できることが見いだされたが、このデータを蓄積し、より精度の高い品質管理を実務で行う必要があると考えられる。
- 2) DSP の品質向上に遅延剤が有効であることが明らかとなったが、遅延剤を用いて製造した DSP の基礎物性について、引き続きデータを蓄積する必要がある。

- 3) DSP を用いたクリンカーフリーコンクリートについては、実機プラントによるデータの蓄積が必要となる。
- 4) DSP の各種コンクリートへの有効利用については、生コンにおいて実現場での実績データを蓄積しているが、コンクリートのフレッシュ性状についてはバラつきが見られるため、改善が必要だと考えられる。プレキャストコンクリートについては、実績データを蓄積する必要がある。

# 謝辭

---

## 謝辞

本論文は、著者が三和石産株式会社テストング事業部在職中に行った研究成果をとりまとめたものです。

本研究を取りまとめるにあたり、研究を始めるきっかけを与えてくださるとともにこれまで終始懇切な御指導御教示を賜りました東海大学工学部教授 笠井哲郎博士に深厚なる謝意を表します。

また、学位論文審査の労をお執りくださいました東海大学工学部教授 渡部憲（主査）、同教授 杉山太宏博士（審査委員）、同教授 梶田佳孝博士（審査委員）、同教授 三神厚博士（審査委員）には、多くの貴重な御助言と温かい御支援を賜りました。ここに記して感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、鹿島建設株式会社技術研究所 主席研究員 関田徹志氏、同研究所建築生産グループ 主任研究員 百瀬晴基氏には研究当初から多岐にわたり御協力と激励をいただきました。ここに記して深く感謝申し上げます。また、大分大学福祉環境工学科 教授 佐藤嘉昭氏には、研究当初から DSP についてご助言頂きました。さらに本研究の第3章の DSP の水和発熱特性においては芝浦工業大学工学部土木工学科 教授 伊代田岳史氏に有益な分析データおよび御助言をいただきました。同じく DSP の化学成分においては前橋工科大学工学部社会環境工学科 准教授 佐川孝広氏に分析データの御提供をいただきました。心より御礼申し上げます。

なお、本研究を進めるにあたって、環境省からは本研究の主旨を御理解いただき平成24～29年度環境研究総合推進費課題(平成24-26年度3K123015, 平成27-29年度3J153001)「スラッジ再生セメントと産業副産物を併用したクリンカーフリーコンクリートによる鉄筋コンクリート部材の研究開発」の一環として実施し、多大な御支援をいただきました。ここに記して深く感謝します。

最後になりましたが、本研究の遂行にあたり、三和石産株式会社代表取締役 中田泰司氏、同取締役生産統括部長 川名正嗣氏、同取締役総務部長 山口正義氏、同研究開発部長 青木真一氏、同テストング事業部長 金子孝邦氏、同テストング事業部のメンバーをはじめ多数の方々には、研究の機会を与えていただくとともに、御指導、御援助をいただいていたものであり、謝意を表するとともに、家族に感謝と敬意を表し謝辞と致します。