

硬化コンクリートの品質向上を目指した  
フレッシュコンクリートの施工性能における  
種々の定量的評価方法に関する研究

2017年3月

山田悠二

# 目次

## 第1章 序論

1.1	研究の背景	1
1.2	コンクリートに用いられる材料	2
1.2.1	コンクリート用材料の種類	2
1.2.2	生コンクリートに用いる骨材の事情	3
1.3	フレッシュコンクリートの品質評価試験の変遷と施工に起因する不具合	4
1.3.1	フレッシュコンクリートの品質評価試験の変遷	4
1.3.2	施工に起因するコンクリート構造物の不具合	4
1.4	スランプと施工性能の関係	5
1.4.1	フレッシュコンクリートの充填性とスランプ	5
1.4.2	フレッシュコンクリートの圧送性とスランプ	7
1.5	研究の目的	8
1.6	本論文の構成	8
	参考文献	10

## 第2章 既往の研究

2.1	はじめに	11
2.2	フレッシュコンクリートの施工性能評価に関する既往の研究	11
2.2.1	スランプ・スランプフロー試験をベースとした評価試験方法	11
2.2.2	テーブル振動機を用いた評価試験方法	11
2.2.3	内部振動機を用いた評価試験方法	12
2.2.4	型枠バイブレータを用いた評価試験方法	12
2.3	コンクリート表面の品質に関する既往の研究	13
2.3.1	見た目を尺度としたコンクリート構造物の品質評価	13
2.3.2	表面性状の改善に関する既往の研究	13
	参考文献	14

## 第3章 フレッシュコンクリートの施工性能評価に必要な試験条件の検討

3.1	はじめに	15
3.2	実験概要	15
3.2.1	使用材料	15
3.2.2	コンクリートの配合条件	16
3.2.3	試験方法	17
3.3	実験結果および考察	20
3.3.1	フレッシュ性状試験結果	20
3.3.2	タンピング試験による振動下の変形性評価	20
3.3.3	加振ボックス充填試験による間隙通過性評価	21

3.3.4	各試験結果と模擬施工試験の関係	22
3.3.5	高強度コンクリートにおける各試験の適用性	23
3.4	まとめ	25
	参考文献	27

## 第4章 非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工性能評価に関する検討

4.1	概説	28
4.1.1	はじめに	28
4.1.2	非鉄スラグ細骨材について	28
4.2	実験概要	29
4.2.1	使用材料	29
4.2.2	コンクリートの配合条件	30
4.2.3	試験方法	31
4.3	実験結果および考察	33
4.3.1	フレッシュ性状試験結果	33
4.3.2	タンピング試験による振動下の変形性評価	33
4.3.3	加振ボックス充填試験による間隙通過性評価	35
4.3.4	加振Lフロー試験による間隙通過性評価	38
4.3.5	ブリーディング特性の検討	41
4.3.6	硬化コンクリートの性状に関する検討	42
4.4	まとめ	44
	参考文献	45

## 第5章 舗装用コンクリートの施工性能評価に関する検討

5.1	概説	46
5.1.1	はじめに	46
5.1.2	スリップフォーム工法について	46
5.2	実験概要	47
5.2.1	使用材料	47
5.2.2	コンクリートの配合	47
5.2.3	試験方法	48
5.3	実験結果および考察	50
5.3.1	フレッシュ性状試験結果	50
5.3.2	タンピング試験による自立性の評価	50
5.3.3	加振ボックス充填試験による充填性評価	51
5.3.4	自立性と充填性の総合評価	52
5.3.5	強度特性およびアブレーション摩耗に関する検討	53
5.4	まとめ	54
	参考文献	55

## 第6章 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工性能評価

6.1 概説	56
6.1.1 はじめに	56
6.1.2 高炉スラグ細骨材について	56
6.2 実験概要	56
6.2.1 使用材料	57
6.2.2 コンクリートの配合条件	57
6.2.3 試験方法	57
6.3 実験結果および考察	58
6.3.1 フレッシュ性状試験結果	58
6.3.2 ブリーディング特性の検討	58
6.3.3 間隙通過性評価	59
6.3.4 タンピング試験による変形性と材料分離の評価	61
6.4 まとめ	62
参考文献	62

## 第7章 表面気泡の挙動の可視化と表面気泡除去および表面の締固めが硬化コンクリートの表層品質に与える影響

7.1 概説	63
7.1.1 はじめに	63
7.1.2 表面気泡抜き取り装置について	63
7.2 実験概要	64
7.2.1 使用した装置	64
7.2.2 可視化実験に関する概要	64
7.2.3 コンクリート実験に関する概要	65
7.3 実験結果および考察	67
7.3.1 モデルコンクリートによる表面気泡の挙動の可視化	67
7.3.2 硬化コンクリートの品質評価	68
7.4 まとめ	70
参考文献	71

## 第8章 結論

8.1 結論	72
8.2 今後の課題と展望	76

謝辞	77
----	----

# 第1章 序 論

## 1.1 研究の背景

わが国は、これまで数多くの震災に見舞われており、阪神淡路大震災や東日本大震災、そして昨年起きた熊本地震などはそれまでの認識を外れた未曾有の災害として記憶に新しい。また、今後も首都直下地震や南海トラフ地震など、国民の生活を脅かす大地震が発生することは多くの研究者達が提言している。このような中、コンクリート構造物が果たすべき役割は大きく、有事に備えるためにコンクリート構造物の構造・耐久性能に対する要求水準は年々高まっている。

十分なコンクリート構造物の構造・耐久性能を得るためには適切な構造・材料設計と、適切な施工を行うことが根底にある。しかしながら近年、コンクリート分野を取り巻く状況の大きな変化から、施工面においては従来よりも高度な技術が求められるようになった。コンクリートの施工における周辺状況の変化は、十分な耐震性を得るための鋼材量の増加、コンクリートポンプ工法の普及、コンクリートの構成材料の変化などに起因し、構造、工法、材料など多岐に渡る<sup>1)</sup>。

材料面においては、フレッシュコンクリートの施工性能をコンシステンシーを表す指標であるスランプにより評価してきた。従来より、良い施工を行うためには、良質な骨材を使用し、なるべくスランプ値を小さくして材料分離を生じ難くしたコンクリートを用いるという概念が定着している。しかし近年では、上述した鋼材量の増加などから、必ずしもスランプを小さくすることが有利にはならない<sup>1)</sup>。また、良質な骨材とは、川砂利や川砂、山陸砂利や山陸砂、海砂などを指すが、これらの採取が困難となっている。そのため、半人工骨材である砕石の利用が全国的に主流となり、また砕砂の利用も近畿、中・四国を中心に増加している<sup>2)</sup>。さらに、産業副産物由来の材料の利用拡大から、コンクリートの構成材料は多様化している。このように、コンクリートに使用する材料は変化し、また多様化しているが、近年では化学混和剤が高性能・高機能化したため、添加する混和剤の種類や添加量によってスランプを調整することが可能である。このため、配合条件や構成材料が全く異なっても同一スランプを有するコンクリートを製造可能な現状となった<sup>3)</sup>。

一方で、同一スランプのコンクリートであっても施工性能、特に振動条件下での挙動は異なることが示唆されるように<sup>4)</sup>、静的条件下で行われるスランプ試験は、加圧、振動、鉄筋による流動の拘束などの外力が作用する実際の施工環境に対応しきれていない。このため、スランプのみで施工性能評価を行ってしまうと、鉄筋配置が厳しい箇所では充填不良や、圧送の不具合、またその他の初期欠陥が生じるリスクを高めることが懸念される。従って、フレッシュコンクリートの施工性能を評価するには、外力作用下で、その流動挙動や材料分離特性を評価する必要がある。

年々、高度・複雑化するコンクリート構造物の構造設計や工法に対し、材料に対する信頼性の向上が求められる。信頼性の高いフレッシュコンクリートとするためには、スランプにより一義的に施工性能を評価するのではなく、施工環境に応じた品質評価を定量的に行い、その結果に基づいて配合設計・施工方法などの見直しを図るというサイクルの構築が必要である。

## 1.2 コンクリートに用いられる材料

### 1.2.1 コンクリート用材料の種類<sup>5)</sup>

図 1.1 から図 1.3 にそれぞれ JIS で規格化されているセメントの種類、骨材の種類、混和材の種類を示す。JIS に規格されているものだけでも、セメント種類は 20 種類、骨材種類は細骨材と粗骨材併せて 15 種類、混和材は 28 種類である。また JIS に規格されていないものも存在し、これら多くの種類の材料を組み合わせただけでも何通りものコンクリートを製造することが可能なことが分かる。さらに、これらの混合割合も変化するため、無限にコンクリートの配合条件は存在する。

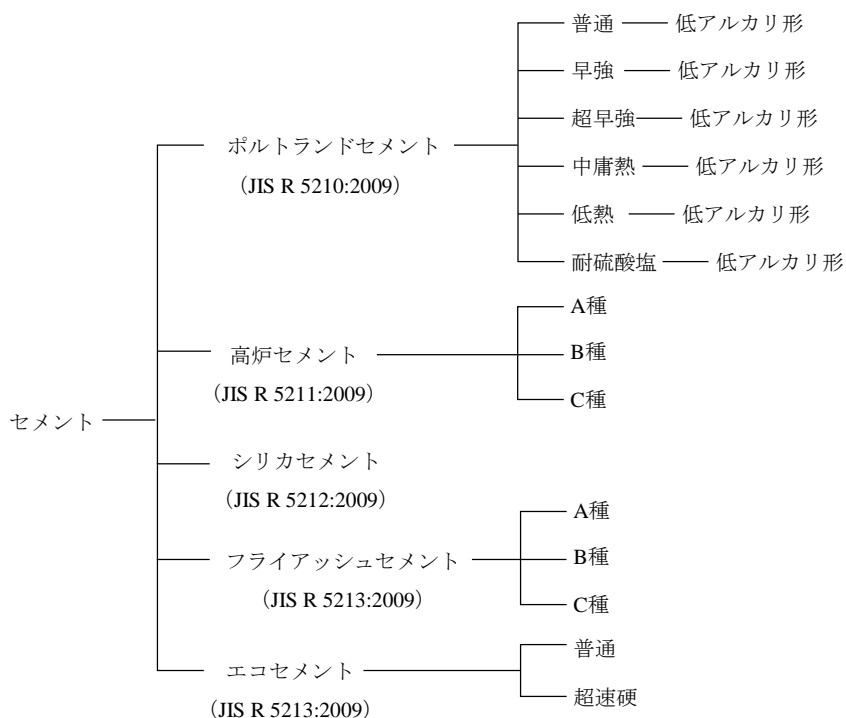


図 1.1 セメントの種類

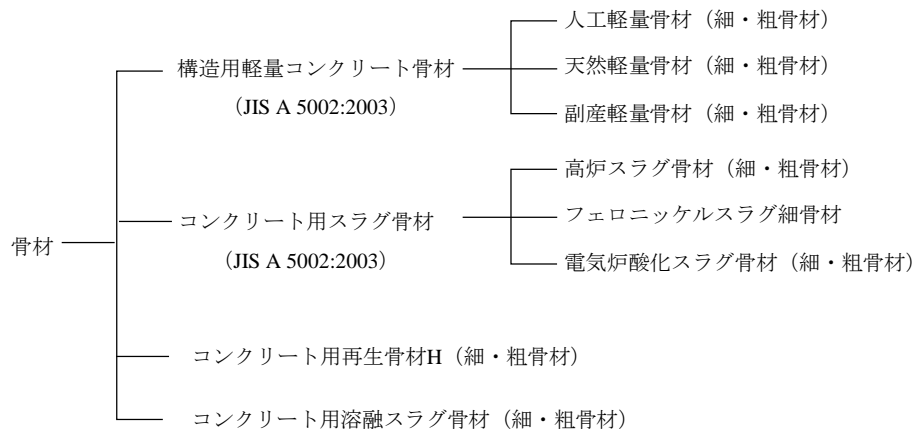


図 1.2 骨材の種類

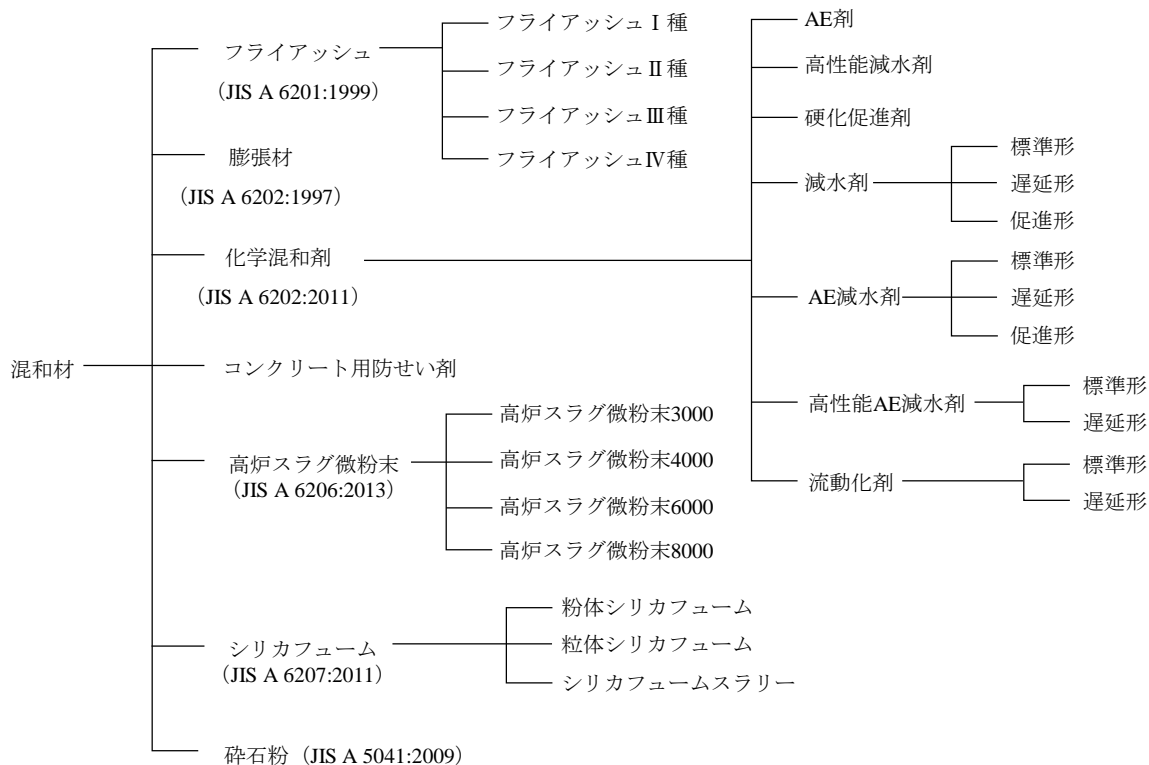


図 1.3 混和材の種類

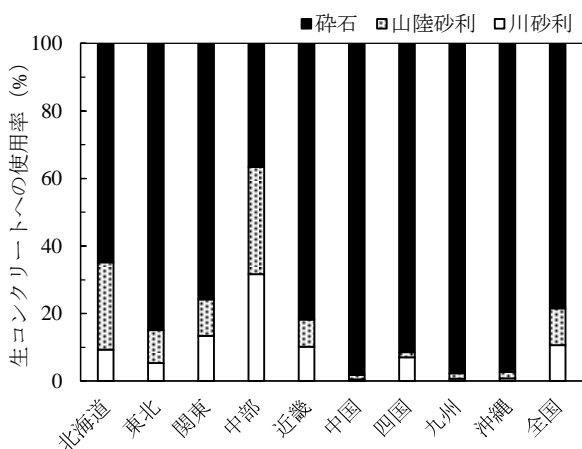


図 1.4 各種粗骨材の使用率

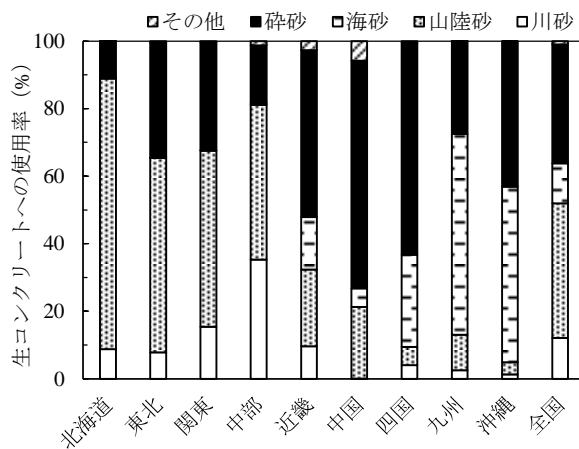


図 1.5 各種細骨材の使用率

### 1.2.2 レディミクストコンクリートに用いる骨材の事情

図 1.4, 図 1.5 に各種粗骨材および細骨材のレディミクストコンクリート用骨材への使用率を示す。図 1.5 の凡例「その他」は、フライアッシュや再生砂などを表す。これらの図は経済産業省の公開データ（平成 27 年度）を参考に作成したものである<sup>2)</sup>。現在では、砕石・砕砂の利用が多ことが分かる。これには、環境保全の観点から川砂利・川砂、海砂の採取が困難となっているという背景がある。また、砕石・砕砂は一般に角ばった形状をしているため、それらを用いたコンクリートは川砂利・川砂を用いたコンクリートと比較して、同一のスランプを得るために必要な単位水量は増加する傾向にあるとされている。

### 1.3 フレッシュコンクリートの品質評価試験の変遷と施工に起因する不具合

#### 1.3.1 フレッシュコンクリートの品質評価試験方法の変遷<sup>6)</sup> (参考文献 6 より引用)

現在、フレッシュコンクリートの品質を確認する試験としてレディーミクストコンクリートに対し、スランプ試験またはスランプフロー試験がそれぞれ JIS A 1101 および JIS A 1150 で規定されている。

スランプ試験は、1931年に土木学会「鉄筋コンクリート標準示方書」の付録の一部として初めて日本で制定された。1949年には工業標準調査会土木建築部会により日本土木建築規格 JES, 土木 1101, 建築 3102 として制定された。その後、1950年に JIS A 1101「スランプ試験方法」として制定された。スランプフロー試験については、1997年及び1998年に日本建築学会と土木学会で高流動コンクリートの指針が制定された後に規格化された。

日本コンクリート工学会では、1985年に JCI-SE9「貫入計によるまだ固まらないコンクリートのワーカビリティ試験方法」、1999年に JCI-SQA1「L(形)フロー試験方法(案)」, JCI-SQA2「充てん装置を用いた間げき通過試験方法(案)」を制定している。また、土木学会編コンクリート標準示方書では、コンクリートの種類や施工状況を想定してスランプ試験の他にブリーディング試験、振動台コンシステンシー試験、締固め性試験、スランプフロー試験、変形性能評価試験等の試験方法が規定されている。コンクリートのワーカビリティ試験は、1930年代にはコンシステンシーを評価するスランプ試験、フロー試験、落下試験の3種類が規定されていたが、1950年代にスランプ試験が JIS 試験となりフロー試験、落下試験は廃止された。

#### 1.3.2 コンクリートの施工に起因するコンクリート構造物の不具合<sup>7)</sup>

施工に起因する不具合は、それぞれが耐荷性、耐久性、美観に何かしらの影響をもたらすが、大まかには、耐荷性・耐久性へ特に影響するものと、美観へ特に影響するものに区分けできる。すなわち、コンクリート内部にまでひび割れや空隙を生じるものは特に耐荷性・耐久性、コンクリート表面にのみ変状をきたすものは美観性へ特に影響すると考えられる。施工に起因する不具合について、区分けしたものを表 1.1 に示す。また、以下に用語の定義を示す。

##### (1) 充填不良(豆板, 内部空洞)

締固めが不十分でコンクリートの一部に骨材が多く集まってできた空隙の多い部分が生じたり、コンクリート内部に大きな空隙ができること。

表 1.1 施工に起因する不具合

低下する性能	不具合の種類	主な原因の所在	備考
耐荷性, 耐久性	充填不良	材料・施工	内部空洞は耐荷性に, 豆板は美観にも特に影響する。
	かぶり不足	設計	-
	コールドジョイント	施工	部材の応力伝達が阻害され, 耐荷性は低下する。
	沈下ひび割れ	材料	-
	漏水	設計・施工	-
美観	砂すじ	材料	-
	表面気泡(あばた)	材料・施工	-
	変色・色むら	材料	-



## (2) かぶり不足

設計図書あるいは構造細目に示されるかぶり厚さが確保されないことにより、コンクリート中の鉄筋が腐食して、かぶりコンクリートにひび割れ、浮き、はく離が生じること。

## (3) コールドジョイント

前に打ち込まれたコンクリートと後から重ねて打ち込まれたコンクリートが一体化しない状態となり、打ち重ねた部分に不連続な面が生じること。

## (4) 砂すじ

せき板に接するコンクリート表面に、コンクリート中の水分が分離して外部に流れ出す場合に生じ、コンクリート表面に細骨材が縞状に露出したもの。ブリーディングの多いコンクリートに生じやすい。

## (5) 表面気泡（あばた）

せき板に接するコンクリート表面に打込み時の巻き込み空気が残存し、それが露出して硬化したもの。

## (6) 沈下ひび割れ

セパレータや鉄筋の下面にブリーディング水が堆積、あるいは空隙が生じることによって、下側のコンクリートが沈降して生じたひび割れ。

## (7) 色むら

コンクリート表面において、色が濃い箇所と白く見える箇所が混在する状態であり、コンクリート表面での水酸化カルシウムの生成状況の違いに起因して生じる<sup>8)</sup>。

## (8) 漏水

コンクリート打継部の不適切な処理や、内部鋼材を介して外部から水分が浸入すること。鋼材腐食やエフロレッセンスの原因となる。

## 1.4 スランプと施工性能の関係

### 1.4.1 フレッシュコンクリートの充填性とスランプ

図 1.6 に土木学会編「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針」に示される、密実な充填を達成するコンクリートの充填性の考え方、図 1.7 に施工性能を確保す

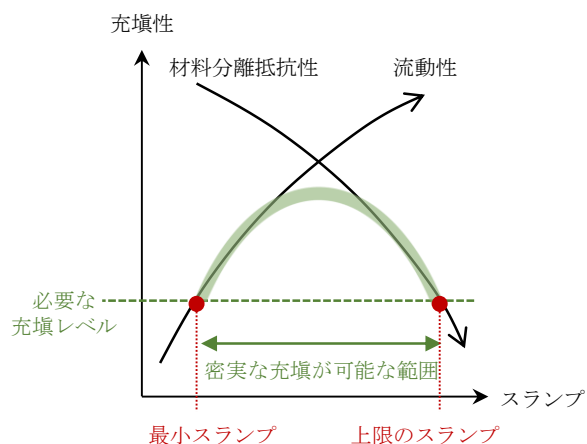


図 1.6 充填性の考え方<sup>9)</sup>

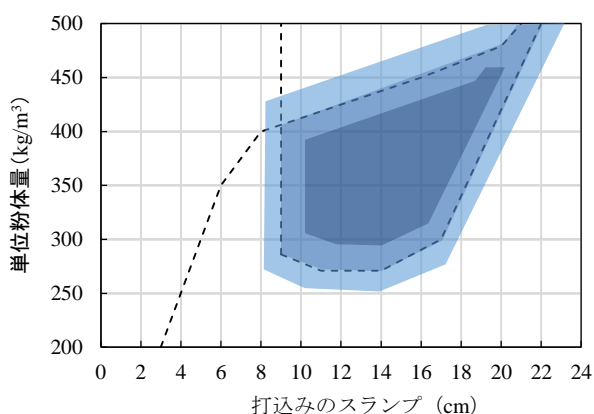


図 1.7 スランプと単位セメントの関係の確認図<sup>9)</sup>

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
A	58	47	150	261	902	998
B	58	37	147	256	710	1200

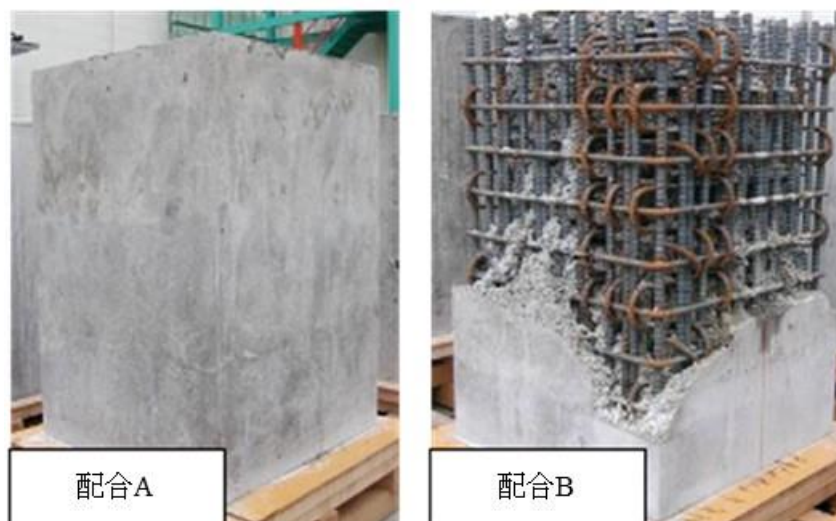


図 1.8 高密度配筋部材の充填状況と用いたコンクリートの配合<sup>9)</sup>

るための打込みのスランブと単位セメント量の関係の確認図の一例を示す<sup>7)</sup>。これらの図は、フレッシュコンクリートの充填性（振動締固め性）はスランブのみで決定されるのではなく、流動性と材料分離抵抗性のバランスによって定まることを表している。コンクリートへの振動付与による流動化と材料分離は、コンクリートの構成材料・配合条件の影響を大きく受けるため、単位水量と単位粉体量（セメントやフライアッシュなどの単位量）だけでなく、使用する粉体や混和剤の種類、骨材の種類や細骨材率（粗骨材のかさ容積）によっても影響を受ける。特に近年では、フライアッシュや各種スラグ骨材をはじめとする産業副産物由来の材料が増えてきており、コンクリートを構成する材料が多様化してきているため、それらの材料の使用が及ぼす充填性への影響についても考慮する必要があると考えられる。

図 1.8 は同一スランブ（8cm）を有するが、配合条件の異なるコンクリートを用いて施工された高密度配筋部材の充填状況とコンクリートの配合である<sup>9)</sup>。配合 A と配合 B は、水セメント比は同じで単位水量および単位セメント量もほぼ同じであるが、細骨材率は大きく異なる。写真を見ると明らかなように、同一スランブのコンクリートであっても配合条件が異なると、施工後の状態はまったく異なる。写真左側では仕上がりが綺麗なのに対し、写真右側ではコンクリートと鋼材が一体となっておらず、鋼材のほとんどが露出し、鉄筋コンクリート部材として全く成り立っていないことが分かる。

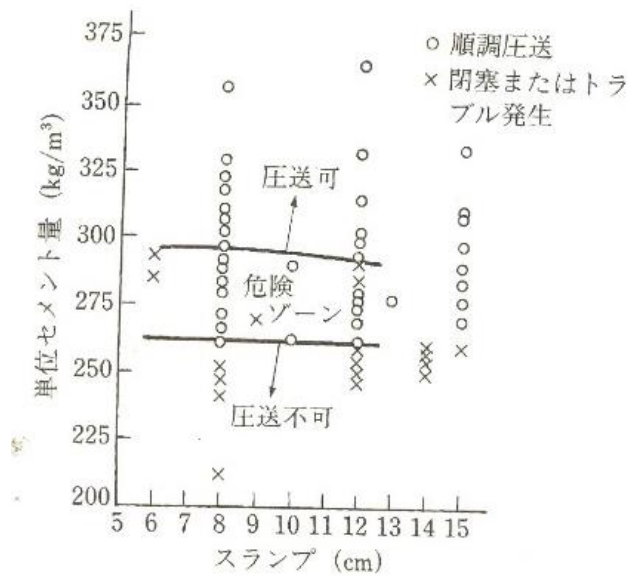


図 1.9 スランプと単位セメント量  
の関係（天然砂）<sup>10)</sup>

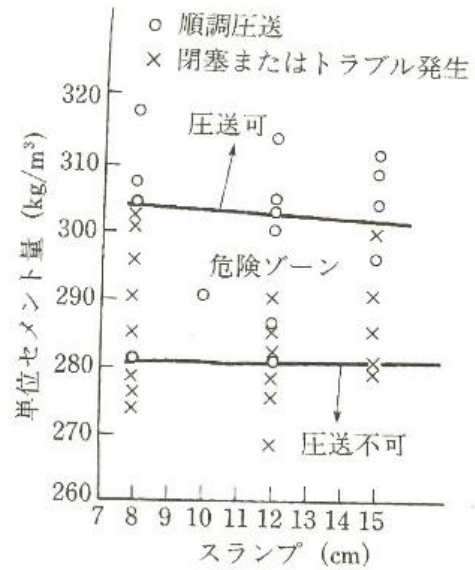


図 1.10 スランプと単位セメント量  
の関係（砕砂）<sup>10)</sup>

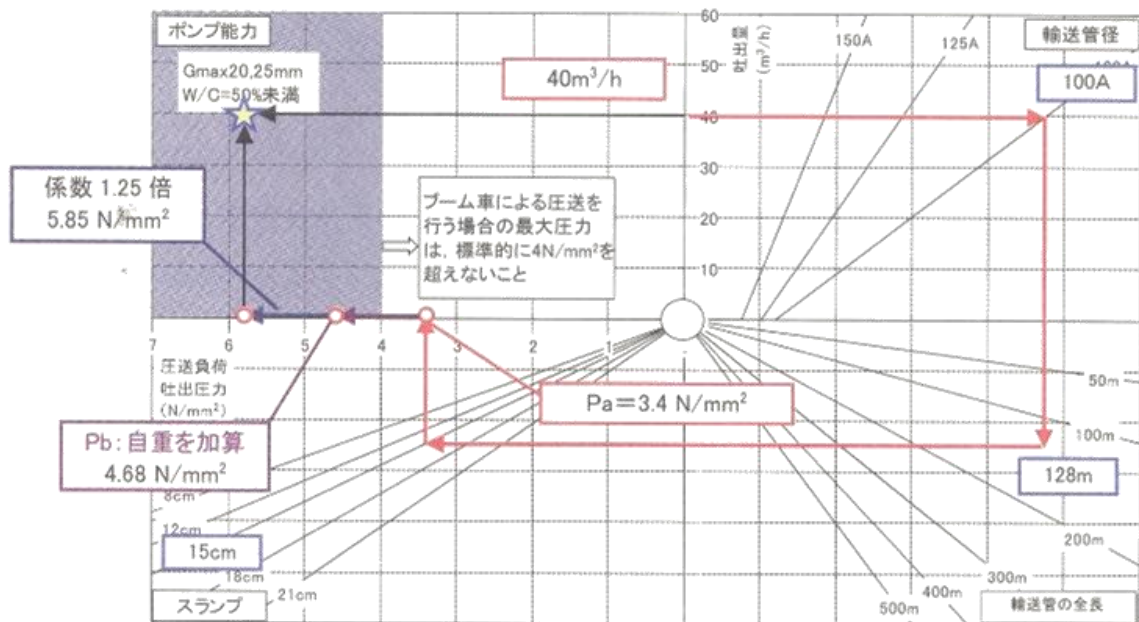


図 1.11 圧送負荷算定図<sup>11)</sup>

#### 1.4.2 フレッシュコンクリートの圧送性とスランプ

図 1.9 および図 1.10 に、土木学会編「コンクリートのポンプ施工指針」に示される粗骨材最大寸法 25mm, 20mm におけるスランプと単位セメント量の関係のを示す. いずれの図においても、同一スランプであっても単位セメント量が異なることで圧送状態は異なっていることが分かる. また、両図を比べると、砕砂を用いた場合では天然砂を用いた場合よりも×（閉塞またはトラブル発生）の分布が多くなっており、細骨材の違いによっても圧送性が異なることが分かる. JCI 編「コンクリート圧送工法ガイドライン」でも、簡易的に

圧送負荷を算定する場合、コンクリートの W/C，粗骨材の最大寸法に応じた圧送負荷算定図を用いることを示している。圧送負荷算定図の一例を図 1.11 に示す。

## 1.5 研究の目的

前節 1.2.1 で示したように、コンクリートの施工に起因する不具合は、コンクリート構造物の耐荷性・耐久性に影響するものと、美観に影響するものに大別できる。本研究では、耐荷性・耐久性に影響を及ぼす不具合のうち、充填不良を取り上げ、種々のコンクリートの充填性を定量的に評価することおよびそのための評価手法を提案することを主目的とした。充填不良を取り上げた理由としては、上述のとおり鋼材量が増加傾向にある近年の構造設計の状況やを鑑みると、優先度が特に高いと考えたためである。

さらに、コンクリート構造物の美観に関する不具合の中から、表面気泡を取り上げ、その改善方法として表面気泡抜き装置に注目し、その効果を明らかにすることとした。表面気泡に注目した理由としては、表面気泡はコンクリート表面の締固め不足によるものであり、広義にはコンクリート表面の充填不良と捉えることができるため、上述の主目的にも関連すると考えたからである。

## 1.6 本論文の構成

本論文は、以下のように全 8 章で構成される。また、図 1.12 に本論文の構成を示す。

第 1 章では、本研究の背景や研究の目的について述べると共に、本論文の構成を示した。

第 2 章では、フレッシュコンクリートの施工性能の評価手法やコンクリートの表層品質に関する既往の研究について取りまとめた。

第 3 章では、フレッシュコンクリートの振動下における変形性および充填性を評価するために必要な試験条件について、第 2 章で取りまとめた施工性能の評価試験方法より選定した、タンピング試験と加振ボックス充填試験を各種配合条件のコンクリートに対して実施し、検討を行った。

第 4 章から第 6 章では、各種施工性能の評価手法における種々のコンクリートへの適用性を確認することおよびその施工性能を明らかにすることを目的に、物性が硬質砂岩碎石・砕砂と大きく異なるスラグ骨材を混合したコンクリートおよび舗装用コンクリートに対して検討を行った。

第 7 章では、表面気泡抜き装置による気泡除去のメカニズムと締固め効果が表層透気性に与える影響について検討した。

第 8 章では、本研究の結論および課題と今後の展望について述べた。

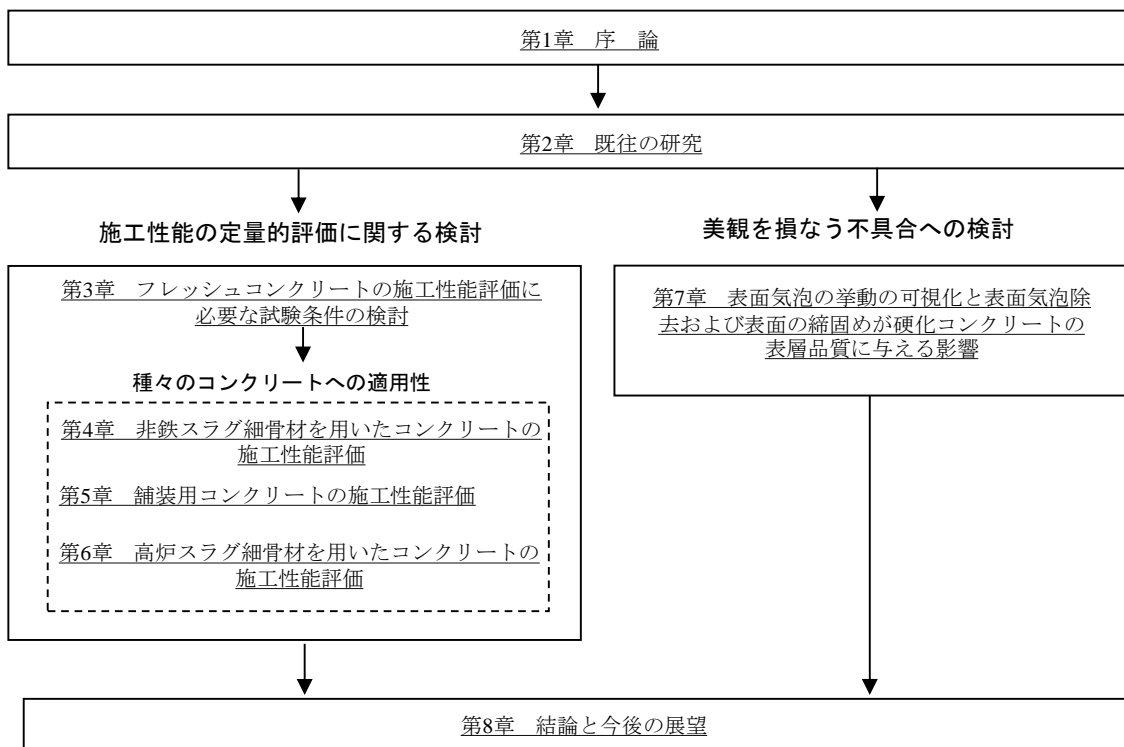


図 1.12 本論文の構成

## 参考文献

- 1) 土木学会編：コンクリート技術シリーズ 94, コンクリートの施工コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会報告書, 2011.5
- 2) 経済産業省 HP：生コンクリート流通統計調査,  
URL： <http://www.meti.go.jp/statistics/sei/namakon/result-2.html>
- 3) 土木学会編：コンクリート技術シリーズ No.54, フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題 (II), 2003.7
- 4) 日本コンクリート工学会編：「施工の確実性を判定するためのコンクリートの試験方法とその適用性に関する研究報告書」, 2009.7
- 5) 土木学会編：コンクリート標準示方書 [2013 年制定], 2013.11
- 6) コンクリートの確実な施工のための PDCA サイクル研究委員会報告書, pp.115-120, 2016.9
- 7) 日本コンクリート工学会編：コンクリート診断技術'14, pp.7-26, 2014.2
- 8) 住友大阪セメント HP, 技術ドキュメント,  
URL： <http://www.soc.co.jp/service/cement/document/>
- 9) 土木学会編：コンクリートライブラリー145, 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針[2016 年版], 2016.6
- 10) 土木学会編：コンクリートライブラリー135, コンクリートのポンプ施工指針[2012 年版], 2012.6
- 11) 日本コンクリート工学会編：コンクリート圧送工法ガイドラインおよび解説, 2009.6

## 第2章 既往の研究

### 2.1 はじめに

本章では、既往のフレッシュコンクリートの施工性能評価方法やコンクリートの表層品質の検査方法および改善手法について取りまとめた。フレッシュコンクリートの施工性能評価方法については、前章で述べたように、実施工においてはコンクリートに外力が加わることを考慮し、振動や障害などによって流動を拘束する条件を付与するものを対象とした。また、スランプ・スランプフロー試験をベースとした評価試験方法、テーブル振動機を用いた評価試験方法、内部振動機を用いた評価試験方法に分け、さらに、流動を拘束する条件を付与するものとそうでないものとに分けて各試験方法を示した。なお、内部振動機によって加振するものの、板を介してテーブル振動機の要領でコンクリートに振動を付与するものは、テーブル振動機を用いた評価試験方法として振り分けた。

### 2.2 フレッシュコンクリートの施工性能評価に関する既往の研究<sup>1), 2), 3)</sup>

#### 2.2.1 スランプ・スランプフロー試験をベースとした評価試験方法

##### (1) 拘束条件を付与しないもの

###### ・タンピング試験

石井らは<sup>4)</sup>、スランプ試験後にスランプ板の四隅を木製棒で打撃して振動を与えることでコンクリートを変形させ、そのときの変形量やスランプ形状によりコンクリートの振動下における変形性を評価する手法を提案している。

###### ・改良スランプコーンおよび型枠バイブレータを用いた粘性評価試験方法

藤代らは<sup>5)</sup>、改良スランプコーンを用いてスランプ試験を行い、その後、スランプ板を小型の型枠バイブレータで振動させたときのコンクリートの変形性能により、簡易に粘性を評価する試験方法について提案している。

##### (2) 拘束条件を付与するもの

###### ・鉄筋障害を用いた逆さスランプ試験

吉田らは<sup>6)</sup>、スランプコーンを逆さにした状態で試料をコーンに詰め、障害（バリア）内でスランプ試験を行い、バリア内試料とバリア外試料の粗骨材量を測定することで、間隙通過性と材料分離抵抗性を評価する試験方法を提案している。

#### 2.2.2 テーブル振動機を用いた評価試験方法

##### (1) 拘束条件を付与しないもの

###### ・加振変形試験

NEXCO JHS 733-2008 では中流動トンネル復工コンクリートの振動下の変形性を評価するにあたり、棒状内部振動機を下部に取り付けたテーブル上でスランプ試験を行い、その後コンクリートを加振して変形させ、その時の変形量によって評価している。

###### ・振動締固め完了エネルギーに基づく評価試験方法

梁らは<sup>7)</sup>、締固め試験装置を用いたコンクリートの締固め完了エネルギーの測定手法を提案している。締固め完了エネルギーとは、型枠中のコンクリートが見掛けのかさ密度から、配合上の理論密度に至るまでに必要なエネルギーであり、この値に基づいて振動締固

め完了範囲を評価できることを示している。

- ・振動台式コンシステンシー試験

JSCE-F 501-1999 では、舗装用コンクリートの締固め性を評価するにあたり、テーブル振動機上でコーンにコンクリートを詰めた後、直ちにコーンを引き上げ、テーブル振動機による加振を行い、コンクリート上円の沈下速度を測定する方法が示されている。

- ・RCD 用コンクリートのコンシステンシー試験方法

JSCE-F507-2013 では、テーブル振動機、容器、すべり棒のついた透明な円板および上載用重りより構成される試験装置を用い、RCD 用の超硬練りコンクリートのコンシステンシーを測る試験方法が示されている。

- ・超固練りコンクリートの締固め性試験方法

JSCE-F 508-2013 では、テーブル振動機、試料容器、振動制御装置、非接触型変位計一式などから構成される締固め性試験機を用いて、締固め効率や締固め完了仕事を算出する方法が示されている。

- ・加振評価試験装置による試験（変形性、締固め性）

府川らは<sup>8)</sup>、高周波内部振動機による振動を、ゴムダンバを介して試験板に与えた中で変形性と締固め性を評価する手法を提案している。変形性を評価する場合は、試験板上でスランプフロー試験を行った後に加振してその拡がりを確認する。締固め性は試験板上の亚克力容器内で、スランプ形状が加振により沈下する際の応答加速度で評価する。

## (2) 拘束条件を付与するもの

- ・加振評価試験装置による評価（間げき通過性）

府川らは<sup>8)</sup>、上述したものと同一振動方法で、試験板上に流動障害 R2 を開口部に取り付けた U 形充てん試験器を設置し、コンクリートが間隙を通過する際の応答加速度により評価する試験方法を提案している。

- ・振動 BAR フロー試験

土木学会委員会報告書では<sup>9)</sup>、テーブル振動機上に障害装置を設置し、障害装置内でスランプ試験を行い、その後加振を行って障害から流出したコンクリートが所要のフローに到達する時間を測定して算出した締固め速度により評価する試験方法を提案している。

## 2.2.3 内部振動機を用いた評価試験方法

### (1) 拘束条件を付与するもの

- ・加振ボックス充填試験

土木学会の報告書では<sup>1)</sup>、高流動コンクリートの充填試験 (JSCE-F 511) に用いるボックス形容器と棒状内部振動機 ( $\phi 28\text{mm}$ )、流動障害を用いた充填性の評価試験を提案している。なお、この試験方法は 2016 年に「ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験方法 (案) (JSCE-F 701-2016)」として土木学会基準となった<sup>3)</sup>。

## 2.2.4 型枠振動機を用いた評価試験方法

### (1) 拘束条件を付与しないもの

- ・加振式 L 形フロー試験

向田らは<sup>10)</sup>、振動機モーターを取り付けた L 型フロー試験器 (JIS A) によって加振時の L



フローを測定することで、振動下のコンクリートの変形性を評価する手法を提案している。

- ・振動傾斜フロー試験

藤原らは<sup>11)</sup>、L型フロー試験器の水平流動部を傾斜させたような容器に振動機およびセンサーを取り付け、振動によってコンクリートをフローさせる試験方法を示している。この試験では、コンクリートの流動端がセンサー間を通過する際の流入速度と流出速度を読み取る。

- ・振動フロー試験

小島らは<sup>12)</sup>、Vロートの側面へ対角に2台の振動モーターを取り付け、加振を行った中でVロート試験を行うことで、振動時の変形性を評価している。

## 2) 拘束条件を付与するもの

- ・振動フロー試験と鉄筋障害を組み合わせた試験

小島らは<sup>12)</sup>、上述の振動フロー試験に付随し、鉄筋障害上にコンクリートを流下させて、飛散した粗骨材の割合から分離係数を算出し、打込み時のコンクリートの材料分離特性を評価している。

## 2.3 コンクリート表層の品質に関する既往の研究

### 2.3.1 見た目を尺度としたコンクリート構造物の品質評価

山口県では、発注者、設計者、施工者が互いに情報を共有して問題点の所在を明らかとすることで、コンクリート構造物の品質向上に繋げるというシステムを導入している。また、システム導入による効果を確認するにあたり、表面のつや、ひび割れ、表面気泡、砂すじの度合を目視調査に基づいて評点を付けることによって、コンクリートの表層品質を定量的に評価する手法が用いられている<sup>10)</sup>。

### 2.3.2 表面性状の改善に関する既往の研究

#### (1) 特殊な型枠・シートを用いた工法

排水可能な型枠の使用および型枠内部に通気性・透水性のあるシートを貼付することで、打込み直後の余剰水や気泡を排出する透水型枠や<sup>13)</sup>、コンクリートから排出される水分を型枠内にとどめることで養生効果を高める湿潤養生マットなどがある。これらの使用はいずれも美観の向上だけでなく、コンクリート表面の緻密性向上に寄与することが報告されている。

#### (2) 再振動による表面気泡の低減

適切な再振動の付与は表面気泡の除去に効果的であることは知られている<sup>14)</sup>、<sup>15)</sup>。しかしながら、気泡除去のために最適な振動時間や最振動を行うタイミングなどがシビアであり、場合によってはコンクリートの品質低下につながる恐れがある。

#### (3) 表面気泡抜き取り装置

先端に等間隔でピアノ線が配置された櫛状の器具であり、打設直後のコンクリートと型枠の境界面に上下させながら挿入し、引き抜くことで表面気泡を除去する装置。この装置の使用により、美観の向上だけでなく、コンクリートを劣化させる因子の侵入を抑制することが報告されている<sup>16)</sup>。

## 参考文献

- 1) 土木学会編：コンクリート技術シリーズ 94，コンクリートの施工コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会会報告書，pp. I 82- I 99，2011.5
- 2) 綾野克紀，宇治公隆，小島正朗，丸屋剛：品質試験方法と実施工時諸特性との相関性評価，コンクリート工学，Vol.48，No.8，pp.3-8，2010.8
- 3) 土木学会編：コンクリートライブラリー145，施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針 [2016年版]，資料編 pp.54-78，2016.6
- 4) 石井佑大，宇治公隆，上野敦：タンピング試験におけるワーカビリティの簡易評価方法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.37-42，2008.7
- 5) 藤代勝，坂井吾郎，坂田昇，進藤竹文：フレッシュコンクリートの粘性評価手法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1073-1078，2006.7
- 6) 吉田浩一郎，大和功一郎，大西利勝：スランプコンクリートの施工性を簡易に評価できる試験方法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.25-30，2008.7
- 7) 梁俊ほか：締固め完了エネルギーに基づくコンクリートの締固め完了範囲の評価方法に関する研究，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.4，pp.438-449，2013
- 8) 府川徹，大友健，新藤竹文，坂田昇：異なるスランプに対するコンクリート施工性能の定量的評価に関する研究，Vol.28，No.1，pp.1061-1066，2006.7
- 9) 土木学会編：コンクリート技術シリーズ No.54，フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題 (II)，2003.7
- 10) 向田隆史，木村 守：加振式 L 形フロー試験器の開発，土木学会中国史部第 59 回研究発表会，pp.337-378，2007.
- 11) 藤原浩巳，丸岡正和，笹倉博行，阿部果林：コンクリートの流動性評価のための新たな試験方法に関する実験的研究，セメントコンクリート論文集，Vol.57，pp.166-171，2003.7
- 12) 児島正朗，三井健郎：衝撃落下による材料分離と打込み欠陥を低減できる材料・調合の評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1173-1178，2004.7
- 13) 例えば，坂田昇，渡辺賢三，細田暁：目視調査に基づくコンクリート構造物の表層品質評価手法の実績と調査結果を反映した表層品質向上技術，コンクリート工学，Vol.52，No.11，pp.999-1006，2014.11
- 14) 犬飼利嗣，三島直生，畑中重光：フレッシュコンクリート中の自由水の挙動と透水・脱水メカニズム，コンクリート工学，Vol.45，No.3，pp.15-22，2007.3
- 15) 十河茂幸：斜面のあばたを減らす工夫，JCM マンスリーレポート，Vol.16，No.2，pp.5-6，2007.3
- 16) 渡邊 健，橋本親典：表面気泡抜き取り装置を用いたコンクリートの締固め効果と劣化因子侵入抑制効果に関する実験的検討，第 38 回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，pp.103-106，2011

### 第3章 フレッシュコンクリートの施工性能評価に必要な試験条件の検討

#### 3.1 はじめに

第1章で述べたように、実施工におけるフレッシュコンクリートの挙動を把握するにあたっては、フレッシュコンクリートに外力（振動や拘束など）を作用させた中で性状を評価する必要がある。そこで本章では、外力作用下でのフレッシュコンクリートの性状評価を行うための試験方法に必要な試験条件の検討と、各種配合条件に対する試験方法の適用性の検討を行った。具体的には前章1.3.1で示した、スランプ試験をベースとし、振動下での変形性を評価するタンピング試験、間隙通過性の評価試験方法である加振ボックス充填試験を、各種配合条件のフレッシュコンクリートに対して実施し、各種要因と試験値の関係について整理した。また、柱部材の一部を想定した形状および鉄筋配置とした型枠による充填試験（以下、模擬施工試験と称する）と各試験の関係についても検討した。

タンピング試験および加振ボックス充填試験を選んだ理由としては、これらの試験は比較的試験器具を入手しやすく、また簡易に行えることから、プラントや現場での実施も可能であり、これらの試験による評価を適用できる機会が多いと判断したためである。

#### 3.2 実験概要

##### 3.2.1 使用材料

表3.1に使用材料を示す。セメントは、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種、

表 3.1 使用材料

種類	材料：記号 ・物性			
	配合シリーズ1	配合シリーズ2	配合シリーズ3	配合シリーズ4
セメント	普通ポルトランドセメント：N ・密度3.16g/cm <sup>3</sup> ・比表面積：3338cm <sup>2</sup> /g	普通ポルトランドセメント：N ・シリーズ1と同様	普通ポルトランドセメント：N ・シリーズ1と同様	普通ポルトランドセメント：N ・シリーズ1と同様 高炉セメントB種：BB ・密度：3.04g/cm <sup>3</sup> ・比表面積：3720cm <sup>2</sup> /g 早強セメント：H ・密度：3.14g/cm <sup>3</sup> ・比表面積：4440cm <sup>2</sup> /g
混和材	—			フライアッシュ JISII種灰：FA ・密度：2.253.04g/cm <sup>3</sup> ・比表面積：4080cm <sup>2</sup> /g
細骨材	海砂：S1 ・密度：2.58g/cm <sup>3</sup> ・吸水率：0.96% ・F.M.：2.60	海砂：S2 ・密度：2.59g/cm <sup>3</sup> ・吸水率：0.89% ・F.M.：2.60	硬質砂岩砕砂：S3 ・密度：2.57g/cm <sup>3</sup> ・吸水率：1.77% ・F.M.：2.36	砕砂：S3 ・シリーズ3と同様
粗骨材	砕石：G1 ・密度：2.66g/cm <sup>3</sup> ・吸水率：1.11% ・F.M.：6.60	砕石：G2 ・密度：2.70g/cm <sup>3</sup> ・吸水率：0.63% ・F.M.：6.61	硬質砂岩砕石：G3 ・密度：2.57g/cm <sup>3</sup> ・吸水率：1.60% ・F.M.：6.72	砕石：G3 ・シリーズ3と同様
混和剤	AE減水剤：Ad1 ・リグニンスルホン酸系 AE剤：Ad2 ・アルキルエーテル系	AE減水剤：Ad1 ・シリーズ1と同様 AE剤：Ad2 ・シリーズ1と同様	AE減水剤：Ad1 ・シリーズ1と同様 AE剤：Ad2 ・シリーズ1と同様	AE剤：Ad2 ・他シリーズと同様 高性能AE減水剤：Ad3 ・ポリカルボン酸エーテル系 FA用AE剤：Ad4 ・高アルキルカルボン酸

早強ポルトランドセメントをそれぞれ使用した。混和材としてフライアッシュ（以降，FAと称する）を用い，細骨材には海砂および砕砂を用いた。粗骨材には，産地が異なる砕石を使用した。

### 3.2.2 コンクリートの配合条件

コンクリートの配合を表 3.2 に示す。配合シリーズを 4 水準を設け，各種検討を行った。配合シリーズ 1 ではレディミクストコンクリートのプラントで実際に使用されている一般的な目標スランプ 8cm の配合を参考に配合設計したものを基準配合とした。この基準配合に対し，図 3.1 に示す「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針（案）」に示される単位セメント量とスランプの関係の確認図（柱部材を対象としたもの）より<sup>1)</sup>，スランプ 8cm のコンクリートにおいて振動締固め性を確保するために必要となる単位セメント量の上限値と下限値の目安を参考に，単位セメント量を 50kg/m<sup>3</sup> 増減させた 3 配合とした（基準配合，貧配合，富配合）。また，配合シリーズ 1 における目標スランプ値は

表 3.2 コンクリートの配合

シリーズ	配合		W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 (Bx%)							
	種類	配合名			W	C	FA	S*	G**	Ad1	Ad2	Ad3	Ad4				
1	基準配合	1-基	55	45	170	309	-	798	1005	0.2	0.0041	-					
	貧配合	1-貧	66	46		259		839		0.3							
	富配合	1-富	47	43		359		756		0.3							
2	基準配合	2-基	52	45	158	300	-	818	1042	0.8	-						
	s/a-5%	2-減	50	40	152			733						1148			
	s/a+5%	2-増	54	50	164			901						940			
3	基準配合	3-基	57	44	170	300	-	780	993	0.6	0.003			-			
	貧配合	3-貧	68	46		250		834								980	0.6
	富配合	3-富	49	43		350		745								988	0.7
	基準 (SL=15cm)	3-基15	50	44	175	350		757								963	0.8
	貧配合 (SL=15cm)	3-貧15	58	46		300		810								951	0.7
4	高強度	N-30	30	43	165	550	70	677	906	-	0.006	1.1	-				
		N-35	35	45		471		-			741	0.004			1		
		N-40	40	47		413		-			789	0.003			0.9		
		NF-30	30	40		550		70			597	-	-	1.5	1.6		
		NF-35	35	42		471					661			0.9	0.9		
		NF-40	40	44		413					709			0.8	0.9		
		BB-30	30	42		550		-			660	-	-	0.011	0.9	-	
		BB-35	35	44		471					726			0.006	0.9		
		BB-40	40	46		413					776			0.005	0.8		
		BBF-30	30	39		550		70			580	-	-	0.65	1.2		
		BBF-35	35	42		471					646			-	0.425	1.5	
		BBF-40	40	43		413					696			0.5	0.7		
		H-30	30	43		550		-			674	-	-	0.02	1.5	-	
		H-35	35	45		471					739			0.006	1.3		
		H-40	40	46		413					787			0.005	1.2		
		HF-30	30	40		550		70			594	-	-	1.3	1.7		
		HF-35	35	42		471					659			-	0.85	1.3	
HF-40	40	44	413	707	0.8	1											

\*シリーズ1ではS1，シリーズ2ではS2，シリーズ3，4ではS3を使用。

\*\*シリーズ1ではG1，シリーズ2ではG2，シリーズ3，4ではG3を使用。

8.0±1.0cm とした。配合シリーズ 2 では骨材量の違いによる影響を検討するため、s/a=45%を基準配合として、単位セメント量は 300kg/m<sup>3</sup> 一定のもと細骨材率を 5% ずつ増減させた 3 配合とし、目標スランプ値は 8.0±1.0cm とした。配合シリーズ 3 はシリーズ 1 と同様に、基準配合（単位セメント量 300kg/m<sup>3</sup>）に対して単位セメント量を 50kg/m<sup>3</sup> ずつ増減させた 3 配合としたが、シリーズ 1 とシリーズ 2 とは異なる骨材を用いることで骨材種類の影響を確認すると共に、目標スランプ値を 8.0±1.0cm および 15.0±1.0cm の 2 水準とした。シリーズ 4 では、高強度コンクリートのように、高粉体系の配合における各試験の適用性を確認するために、単位セメント量を 413~550kg/m<sup>3</sup> と高粉体として水セメント比 35%を基準として 5%ずつ増減させた。また、3 種類のセメントを用い、さらに、それらの配合にフライアッシュ（以降、FA と称する）を 70kg/m<sup>3</sup> 混和して粉体種類の影響を確認した。配合シリーズ 4 における目標スランプ値は 12.0±2.0cm とした。シリーズ 1~4 のいずれの配合も目標空気量は 4.5±1.5%とした。

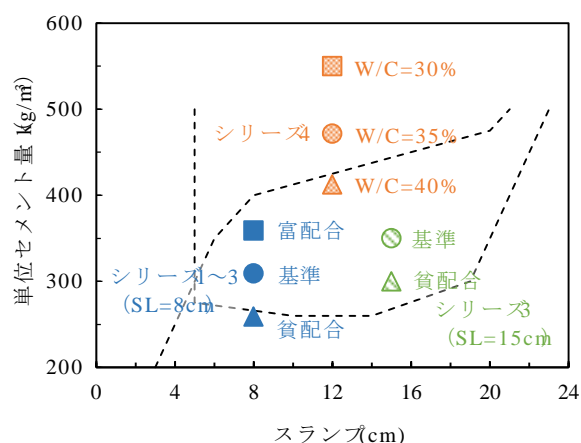


図 3.1 単位セメント量とスランプの関係の確認図（柱部材を対象としたもの）

### 3.2.3 試験方法

#### (1) フレッシュ性状試験

スランプ試験を JIS A1101, 空気量試験 JIS A 1128 に従い行った。また、練上がり直後のコンクリート温度（以下、C.T.と称する）も測定した。

#### (2) タンピング試験

タンピング試験は既往の研究<sup>2), 3)</sup>を参考に、以下の手順で行った。試験状況を写真 3.1 に示す。まず、表乾状態の細骨材を 1~2cm 程度の厚さで敷き均し、その上にスランプ板を設置してスランプ試験を実施した。木製棒（質量 1.2 kg）を 50cm の高さからスランプ板の四隅に順次落下（以下、タンピングと称する）させた。このとき、タンピングの位置はスランプコーンの中心から 30 cm とした（図 3.2）。タンピング 8 回ごとにスランプおよびス

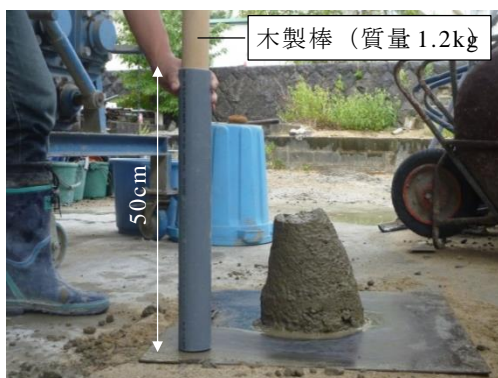


写真 3.1 タンピング試験状況

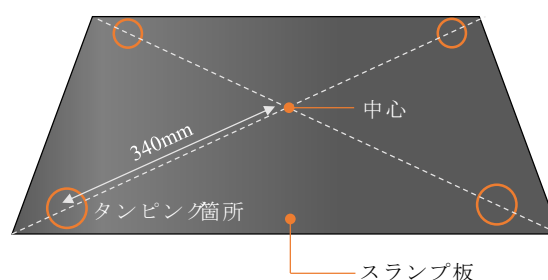


図 3.2 タンピング箇所の概要



写真 3.2 試験装置の外観

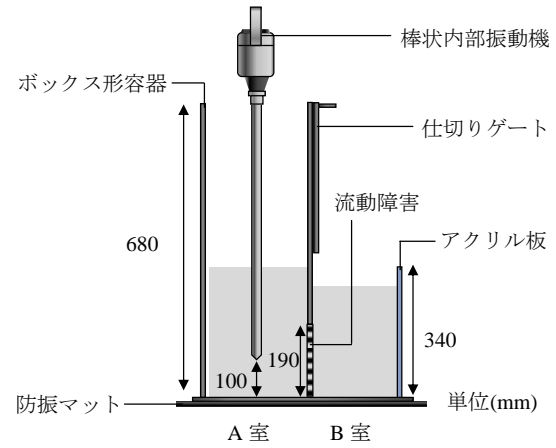


図 3.3 加振ボックス充填試験の概要

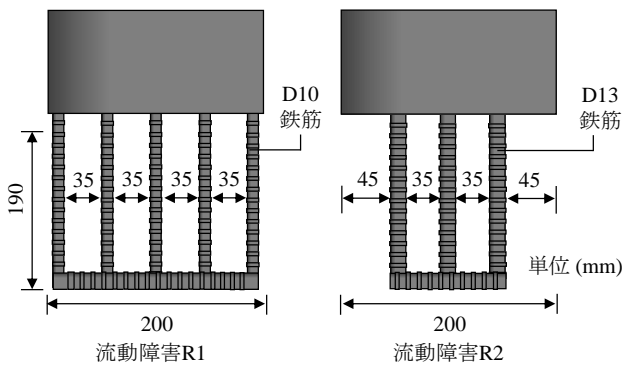


図 3.4 流動障害の概要

表 3.3 加振ボックス充填試験条件

試験条件	振動条件	流動障害
1	280Hz	R2
2		R1
3	140Hz	R2

ランプフローを測定するとともにスランプ形状を目視確認した。結果についてはタンピング回数 32 回までのスランプフローを縦軸に、タンピング回数を横軸に取った散布図のプロットを線形回帰した時の傾きをスランプフロー変形係数  $K_{sf}$  (mm/回) とした。

### (3) 加振ボックス充填試験

試験装置の外観を写真 3.2、試験概要を図 3.3 に示す。加振ボックス充填試験は、高流動コンクリートの充填試験 (JSCE-F 511) のボックス形容器と棒状内部振動機 ( $\phi 28\text{mm}$ )、流動障害を用いた (図 3.4)。配合条件の違いを評価する上で最適な条件を検討するため、配合シリーズ 1 に対し表 3.3 に示す試験条件で行った。試験方法は既往の報告の試験方法 (試案)<sup>3)</sup> に準拠し、以下の手順で実施した。まず、ボックス形容器を水平に設置した。仕切りゲートを閉じた状態で試料を A 室に 3 層に分けて詰め、A 室上面をならし、棒状内部振動機を静かに A 室中央へ挿入した後、仕切りゲートを引き上げ加振した。加振開始から B 室隅角部の試料平均高さが 190mm と 300mm に到達するのを目視確認し、その時間を計測して式 2.1 より間隙通過速度  $V_{pass}$  (mm/s) 算出した。加振終了後、A 室下部、B 室上部の試料を約 1.6L 採取し、JIS A 1112 に従い洗い分析試験を行い粗骨材量を測定した。A 室・B 室の粗骨材量 ( $G_A$ ,  $G_B$ ) および配合上の粗骨材量 ( $G_0$ ) より A 室と B 室の粗骨材量変化率 ( $\delta_A$ ,  $\delta_B$ ) を式 2.2 により算出し、A 室と B 室の粗骨材変化率の相対変化を総粗骨材量変化率 ( $\delta_{A-B}$ ) とした。

$$V_{pass}(\text{mm/s}) = \frac{300\text{mm} - 190\text{mm}(= 100\text{mm})}{300\text{mm 到達時間}(\text{s}) - 190\text{mm 到達時間}(\text{s})} \quad (2.2)$$

$$\delta_A(\%) = \frac{G_A}{G_0} \times 100, \quad \delta_B(\%) = \frac{G_B}{G_0} \times 100, \quad \delta_{A-B}(\%) = |\delta_A - \delta_B| \quad (2.2)$$

#### (4) 模擬施工試験

模擬施工試験は、配合シリーズ1および配合シリーズ2のコンクリートを用いて行った。試験概要を図3.5に示す。型枠（500×500×400mm）は高周波フレキシブル型バイブレータφ50mm（以下、高周波パイプと称する）を用いた標準的な締固め間隔500mmを想定した平面上の大きさとし、また、試験室の練混ぜ機の容量を考慮した試料の量60Lが締固め前に収まる高さとした。模擬型枠はかぶり近傍の鉄筋が配置されている箇所を想定しており、かぶり近傍の鉄筋は柱部材において打込みの最小スランプが8cmとなる配筋条件(表3.4)とした。試験の手順は、投入口から60Lの試料を打込み、高周波バイブレータを所定の位置に挿入して加振を15秒間行い、かぶり部の充填された試料高さを透明枠側で5秒間隔で測定した。また、型枠の寸法から考えると60Lの試料を完全に締固めたときの充填高さは240mmとなる。これに対して、加振15秒でその約8割となる充填高さ200mmを超えるかを充填性の判断の目安とした。

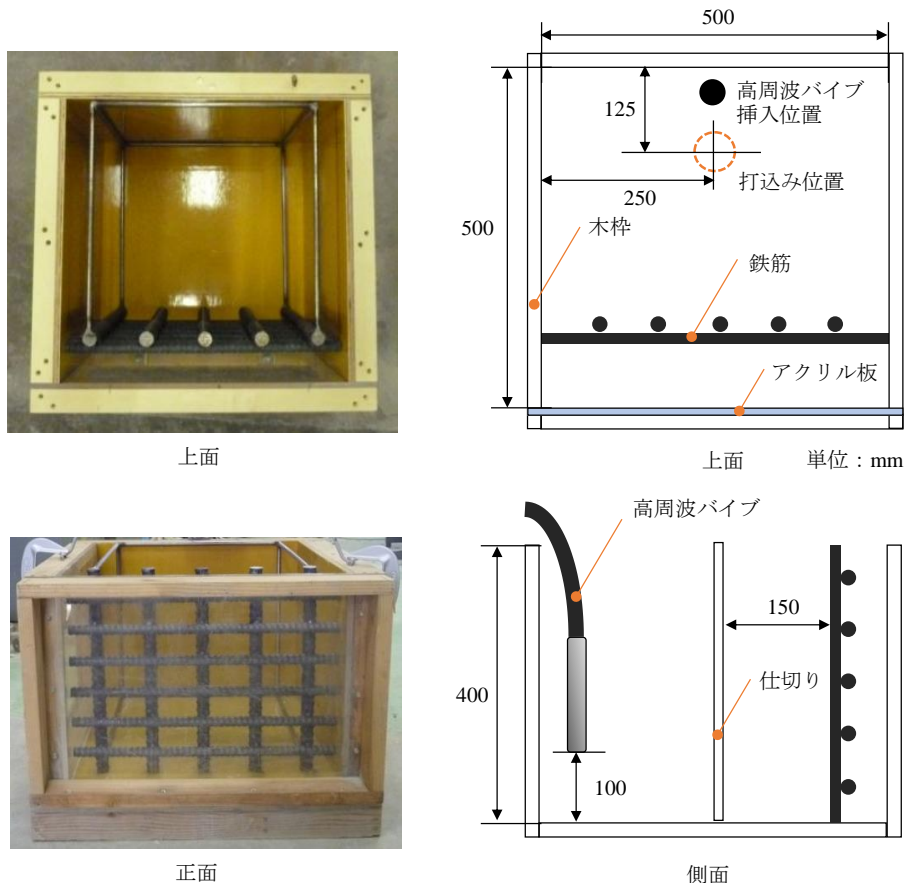


図 3.5 模擬施工試験の概要

表 3.4 模擬施工試験の配筋条件

項目	条件
主鉄筋配置	D25鉄筋, ctc100, 型枠までの距離75mm
帯鉄筋配置	D19, ctc60
有効鋼材量	675kg/m <sup>3</sup>
かぶり	53.5mm
最小あき	41mm

### 3.3 実験結果および考察

#### 3.3.1 フレッシュ性状試験結果

各種配合におけるフレッシュ性状試験結果を、表 3.5 に示す。いずれの配合も目標スランプ値および目標空気量を満たしていることを確認した。これらのフレッシュ性状を有するコンクリートに対し、以降の検討を行った。

#### 3.3.2 タンピング試験による振動下の変形性評価

図 3.6 に各種配合とタンピング試験結果のスランプフロー変形係数  $K_{sf}$  の関係を示す。一部の配合（配合名：3-基 15, 3-基 15）を除き、スランプ値は同程度であるにも関わらず、 $K_{sf}$  は各種配合で異なった。単位セメント量を変化させたシリーズ 1 とシリーズ 3 の配合（基準配合, 貧配合, 富配合）では、いずれのシリーズも貧配合では基準配合よりも  $K_{sf}$  は大きく、富配合では小さくなった。これは、単位セメント量の変化に伴ってモルタルの粘性が変化したことに起因する。貧配合では粘性の低下によって振動条件下で変形しやすくなったと考えられ、この傾向はスランプ 15cm の配合（配合名：3-基 15, 3-貧 15）においても同様であった。富配合では粘性の増大によって振動条件下での変形が生じにくくなったと考えられる。

粗骨材量の影響に着目したシリーズ 2 では、 $s/a$  が大きい配合（配合名：2-増）、すなわち単位粗骨材量が少ない配合において  $K_{sf}$  は大きくなった。しかし、基準配合と細骨材率が小さい配合（配合名：2-減）に差はなく、細骨材率による  $K_{sf}$  は明瞭にはならなかった。

これらより、タンピング試験試験では単位セメント量の違いによる配合間の変形性の差異、すなわち粉体量の違いに起因する粘性の変化に伴う変形性の差異を検出することができる一方で、粗骨材量の違いが変形性にもたらす影響については明確に捉えることが難しいことが分かった。

表 3.5 フレッシュ性状試験結果

シリーズ	種類	配合名	SL	Air	C.T.
1	基準配合	1-基	8.0	4.0	18.7
	貧配合	1-貧	8.5	4.5	18.4
	富配合	1-富	8.0	4.0	17.5
2	基準配合	2-基	7.5	4.2	24.0
	s/a-5%	2-減	8.5	4.2	26.0
	s/a+5%	2-増	9.0	5.2	27.0
3	基準配合	3-基	8.5	4.2	21.5
	貧配合	3-貧	9.0	4.6	21.5
	富配合	3-富	8.0	5.7	21.7
	基準 (SL=15)	3-基15	15.5	6.0	-
	貧配合 (SL=15)	3-貧15	15.0	6.0	-
4	高強度	N-30	10.0	4.0	23.4
		N-35	11.0	4.6	22.3
		N-40	12.0	5.7	22.5
		NF-30	13.0	6.0	23.1
		NF-35	11.0	4.6	22.7
		NF-40	12.0	6.0	21.9
		BB-30	13.0	3.0	21.2
		BB-35	14.0	3.9	21.0
		BB-40	11.5	3.1	20.9
		BBF-30	11.5	5.7	20.7
		BBF-35	10.5	6.0	21.6
		BBF-40	11.5	5.7	20.3
		H-30	13.5	5.3	22.9
		H-35	13.0	6.0	23.4
		H-40	13.5	5.0	22.9
		HF-30	13.5	4.2	23.4
HF-35	11.0	5.6	22.4		
HF-40	13.0	5.9	22.2		

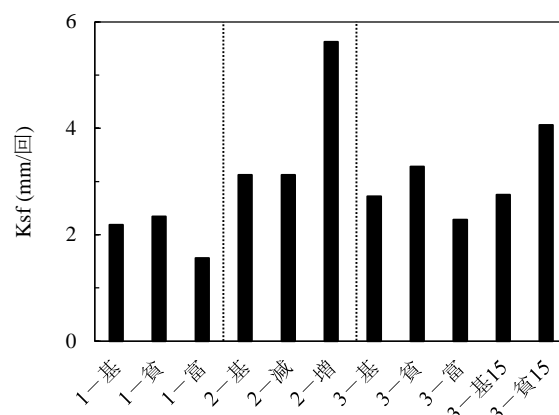


図 3.6 各種配合のスランプフロー変形係  $K_{sf}$



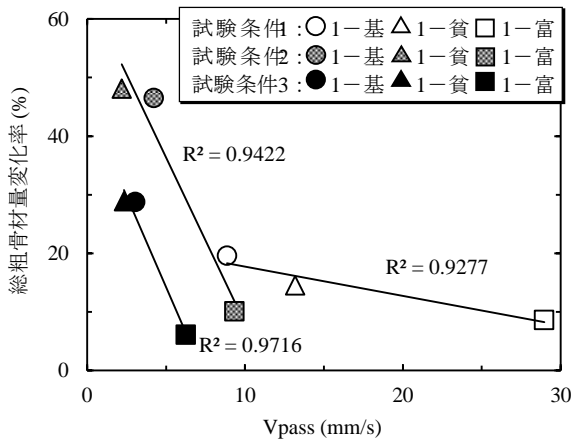


図 3.7 各試験条件における Vpass と総粗骨材量変化率の関係の関係

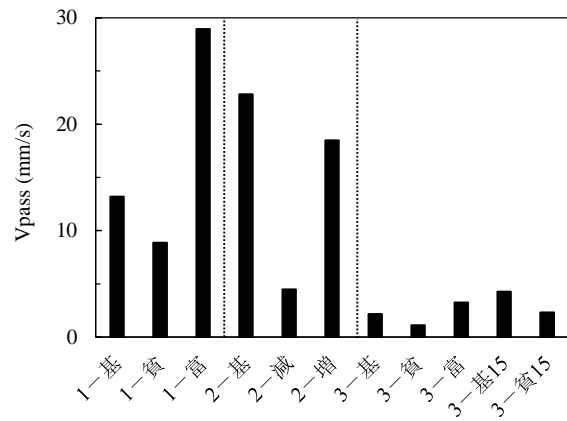


図 3.8 各種配合における Vpass

### 3.3.3 加振ボックス充填試験による間隙通過性評価

#### (1) 試験条件の影響

図 3.7 に配合シリーズ 1 を用いて行った各種試験条件における加振ボックス充填試験結果の Vpass と総粗骨材量変化率の関係を示す。試験条件によらず、単位セメント量の増大と共に Vpass は速くなり、総粗骨材量変化率は小さくなった。すなわち、単位セメント量が多いほどモルタルと粗骨材の分離が生じにくく、充填性が良好であることを示した。試験条件ごとで比較すると、流動障害 R1 を用いた試験条件 2 や振動数を小さくした試験条件 3 では充填条件として厳しいため、試験条件 1 と比較して Vpass は遅くなり、総粗骨材量変化率は大きくなった。また、試験条件 2 と試験条件 3 では標準配合と貧配合の差異が小さく、配合間の差異が表れにくくなった。

これらの結果から、振動数は通常 (280Hz)、流動障害 R2 を用いた試験条件が配合条件の相違による充填性の変化を評価するには有効であると分かった。以降、加振ボックス充填試験は振動数 280Hz、流動障害 R2 を用いた。

#### (2) 配合要因の影響 (配合シリーズ 1~3)

図 3.8 に各種配合における Vpass を示す。シリーズ 1 およびシリーズ 3 では前述したように、両シリーズとも単位セメント量の増大と共に Vpass は増大した。しかし、シリーズ 1 とシリーズ 3 では使用骨材の違いから Vpass の値に大きな差があった。また、シリーズ 3 では、スランプ 8cm 程度のコンクリートと 15cm 程度のコンクリートで Vpass に大きな変化は見られず、スランプの影響は小さかった。配合シリーズ 2 では、細骨材率を小さくした場合に (配合名: 2-減), Vpass が遅くなった。これは、細骨材率の低下に伴ってコンクリート中の粗骨材濃度が増大し、粗骨材同士や鉄筋と粗骨材の接触の頻度が多くなることが鉄筋間の流動を阻害したためと考えられる。

以上から、加振ボックス充填試験により、単位セメント量の減少や使用骨材、細骨材率の低下に伴う充填性の低下を評価できることが確認できた。

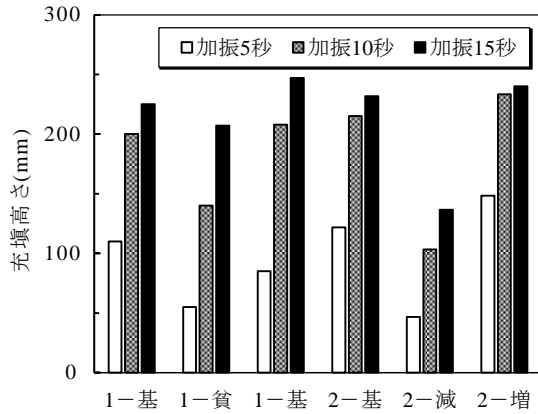


図 3.9 模擬施工試験における充填高さ

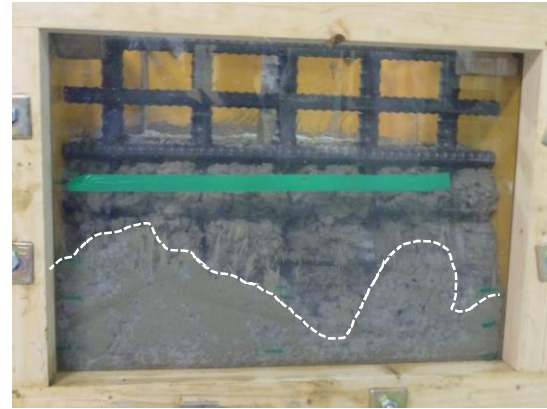


写真 3.3 充填状況 (配合: 2-減)

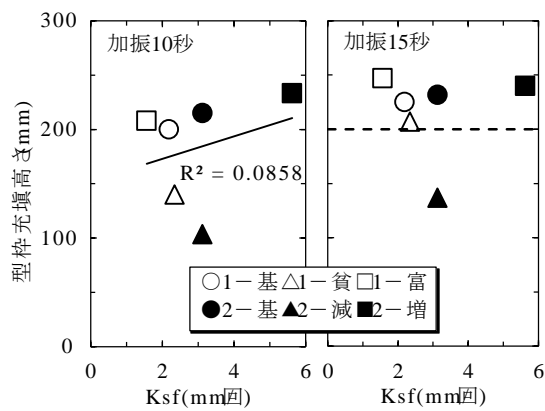


図 3.10 充填高さと Ksf の関係

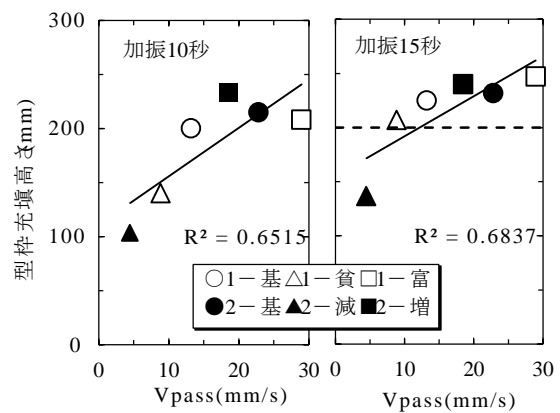


図 3.11 充填高さと Vpass の関係

### 3.3.4 各種試験結果と模擬施工試験の関係

本実験では、配合シリーズ 1.およびシリーズ 2 のコンクリートを用いた。図 3.9 に模擬施工試験における各種配合の充填高さを示す。充填高さは、単位セメント量が少ない配合や細骨材率が小さい配合において低くなった。これは、単位セメント量の低下により粘性が低下してモルタルと粗骨材の分離が生じ易くなったことや、細骨材率の低下に伴って粗骨材濃度が大きくなり、粗骨材間および粗骨材と鉄筋の接触が多くなったためと考えられる。また、充填性が良好でない配合では、写真 3.3 に示すように上方から下方に向かってコンクリートが落ちるように鉄筋間から吐出され、破線で囲ったようにコンクリートが積み上げられる形となる不連続な充填挙動を示した。これは、かぶりの下部において鉄筋間の閉塞が生じ、コンクリートが流動できなくなったことが影響したと考えられる。

図 3.10 に模擬施工試験における加振 10 秒後と 15 秒後の充填高さとスランプフロー変形係数 Ksf の関係を示す。Ksf の値は、模擬施工試験において充填性が良好な配合に対しては相関が見られたが、充填性が劣る配合（配合名：1-貧，2-減）に対して比較的に値が大きくなっており、過大評価となっていることから、充填性が低い配合を検出することができなかった。

図 3.11 に模擬施工試験における加振 10 秒後と 15 秒後の充填高さと間隙通過速度 Vpass の関係を示す。加振ボックス充填試験結果の Vpass では、実施工試験の充填高さと右肩上

がりの関係が見られており，特に充填性が劣る配合に対してその傾向を良く捉えることができた．また，細骨材率を小さくした配合（配合名：2-減）では，加振を 15 秒行っても充填高さは 140mm 程度であり，他の配合と比べると相当に充填性が低くなった．この配合における加振ボックス充填試験の  $V_{pass}$  は 5mm/s 以下となっていることから，加振ボックス充填試験において間隙通過速度が 5mm/s 以下となる配合では，実施工においても充填性が劣ると考えられる．

### 3.3.5 高強度コンクリートにおける各試験の適用性

本実験では，配合シリーズ 4 のコンクリートを用いた．配合シリーズ 4 では，単位水量および単位粗骨材量をすべての配合で一定としており，また骨材の種類もすべて同じである．従って，配合間で振動下の変形性や充填性が相違する要因は，モルタルの粘性と粉体粒子の形状のみである．既往の研究で示唆されるように<sup>4)</sup>，モルタルの粘性は測定方法や測定条件の影響を受け易いため，的確に実測するには高い技術力を要する．一方で，モルタルの粘性は，粉体の総表面積と相関することが報告されている<sup>5)</sup>．すなわち，粉体量が多く，粉体粒子が細かいほど粘性は高くなる傾向にある．従って，相対的な比較は可能である．そこで本実験では，藤倉らの報告を参考に<sup>5)</sup>，モルタルの粘性をコンクリート中のセメントおよびフライアッシュの表面積の総和（以降，粉体総表面積と称する）を粉体の比表面積と単位セメント量の積により求め， $K_{sf}$  および  $V_{pass}$  との関係について整理した．

#### (1) タンピング試験結果

粉体総表面積と  $K_{sf}$  の関係を図 3.12 に示す．全配合水準では，粉体総表面積と  $K_{sf}$  に相関性は認められなかった．FA 無混和の配合水準でセメント種類別に比較すると，普通ポルトランドセメントを用いた場合は粉体総表面積と  $K_{sf}$  は右肩下がりの関係，その他のセメントでは右肩上がりとなり，セメント種類によって傾向は異なった．FA 混和の配合では，早強セメントを用いた場合のみ右肩下がりとなり，その他のセメントでは右肩上がりとなった．FA 混和の有無で比較すると，最も粉体総表面積が大きい配合（HF-30）を除き，粉体総表面積と  $K_{sf}$  には概ね右肩上がりの傾向にあった．以上より，セメント種類による影響は明確ではないが，FA を混和した場合には粘性の増加と共に  $K_{sf}$  も増加した．

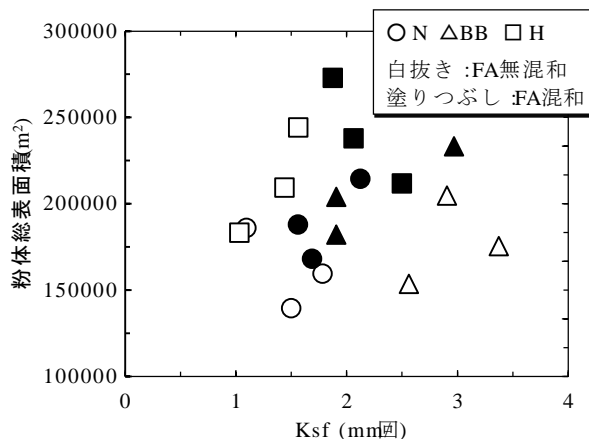


図 3.12 粉体総表面積と  $K_{sf}$  の関係

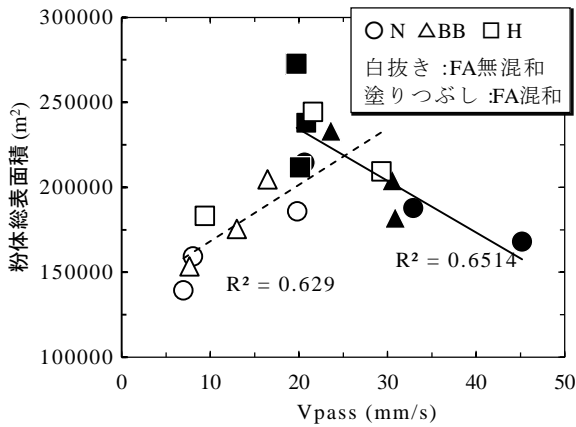


図 3.13 粉体総表面積と Vpass の関係

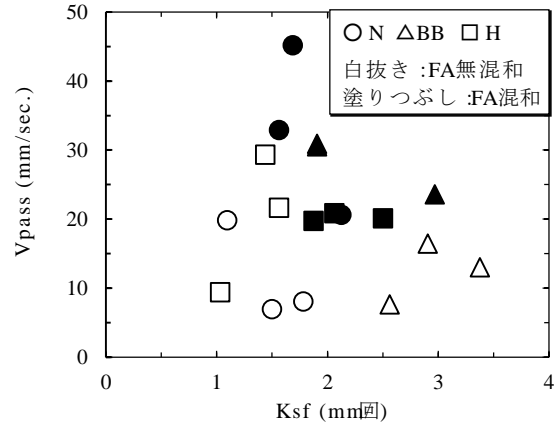


図 3.14 Ksf と Vpass の関係

## (2) 加振ボックス充填試験結果

粉体総表面積と Vpass の関係を図 3.13 に示す。FA 混和の有無に着目すると、セメント種類によらず FA 無混和の配合では、粉体総表面積の増大と共に Vpass は大きくなった。FA を用いた場合、粉体総表面積と Vpass は右肩下がり関係となり、また全体的に無混和よりも Vpass は速くなった。FA を混和した場合、粉体総表面積が小さいほど、すなわち、粘性が小さいほど充填性の向上に寄与した。粉体総表面積が同程度の場合、FA 混和による充填性の向上は、ボールベアリング効果の付与によるものと考えられ<sup>6)</sup>、粘性が小さい範囲では FA 粒子の回転が円滑になったため、これが充填性の向上に寄与したと考えられる。

セメント種類に着目すると、早強ポルトランドセメントと FA を用いた配合水準では、いずれの配合も Vpass は 20mm/s 程度であり、配合間で差がほとんどなかった。また、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を用いて FA を混和した配合や FA 無混和の配合であっても、粉体総表面積 210000m<sup>2</sup> 程度を超えたものは Vpass が 20mm/s あたりに分布した。従って、粘性が特に高い場合には Vpass はほぼ一定になると考えられる。

またこれらのことから、高強度コンクリートの配合（高粉体量の配合）に対して FA を混合する場合、粉体総表面積が 210000m<sup>2</sup> より小さくなるように配合設計することで効果的に充填性の向上を図ることができると考えられる。

## (3) タンピング試験と加振ボックス充填試験の関係

図 3.14 にタンピング試験結果の Ksf と加振ボックス充填試験結果の Vpass の関係を示す。全配合水準で比較すると、両者に相関があるとは言いがたい。FA 混和の有無ごとで比較すると、FA 無混和の場合では両者の関係は概ね横ばいであった。FA を混和した場合は、両者に概ね右肩下がり関係がみられたが、早強ポルトランドセメントを用いた配合では、Vpass は配合間でほぼ一定であるのに対して Ksf は差異が生じていることが分かる。

加振ボックス充填試験においては、内部振動機の振動によりコンクリートを流動化して A 室から流動障害を通過させ B 室へ移動させる上で、コンクリートの構成材料の中で最も容積割合の大きい粗骨材の挙動が支配的要因である。従って、高粉体量の配合においては、粉体の量や特性が粗骨材の流動に及ぼす影響を捉えていると考えられる。一方、タンピング試験では、木製棒を用いてスランプ板を打撃することでコンクリートに振動エネルギー

を伝達させるため、間接的に振動を付与する試験条件である。そのため、粒子あたりの質量が大きい粗骨材の挙動に試験値が左右されるというよりも、モルタルの拡がり易さ、すなわち粉体や細骨材自体の特性を捉えている可能性があり、このような違いから両試験の相関が表れにくかったと考えられる。そのため特に粉体粒子が多い早強セメントを用いた場合において、 $V_{pass}$  には配合間で差異が生じないものの  $K_{sf}$  には差異が生じたと考えられる。また、FA を混合した場合には、FA 粒子の回転が粗骨材間の摩擦や粗骨材と鉄筋の摩擦を低減させると考えられ、FA 粒子の回転のし易さはモルタルの粘性に依存するため、 $K_{sf}$  と  $V_{pass}$  にある程度の相関性が見られたと考えられる。

### 3.4 まとめ

本章では、フレッシュコンクリートの施工性能評価試験方法に必要な試験条件の抽出およびそれらの試験の適用性を検討することを目的に、タンピング試験および加振ボックス充填試験を各種配合条件のコンクリートに対し行った。本章の結果をまとめると以下のようになる。

- (1) タンピング試験を実施して振動下の変形性を評価した結果、同一スランブのコンクリートであっても、単位セメント量の違いによってスランブフロー変形係数  $K_{sf}$  は異なることが確認できた。
- (2) 加振ボックス充填試験により配合条件の相違による充填性の変化を評価するにあたっては、振動数を通常 (280Hz) とし、流動障害 R2 を用いた試験条件が有効であった。この試験条件によって単位セメント量だけでなく、細骨材率や骨材種類による充填性への影響を捉えることができた。
- (3) 柱部材を想定した模擬施工試験における充填高さは、加振ボックス充填試験結果の間隙通過速度  $V_{pass}$  との相関が高かった。模擬施工試験とタンピング試験との相関は、配合条件によっては認められるが、単位セメント量が小さい場合や細骨材率が小さい配合に対する相関は低かった。
- (4) 高強度コンクリート用の高粉体な配合に対し、タンピング試験ではセメント種類や配合間の相違による傾向や FA 混和の有無による変化を明確にすることは困難であった。一方、加振ボックス充填試験では、セメント種類やフライアッシュの混和の有無による充填性への影響を評価できた。また両試験の相関については、FA を混和した配合には概ね  $K_{sf}$  の増加と共に  $V_{pass}$  は低下する傾向が見られた。

以上から、フレッシュコンクリートの充填性評価を行うためには、振動条件だけでなく拘束条件が必要であり、加振ボックス充填試験のように型枠および鉄筋を用いることが望ましい。タンピング試験によって評価できる振動下の変形性は、配合条件によって充填性との相関の度合いが変化するため、適用できる配合条件の範囲を明確にする必要がある。しかし、試験の簡易性に優れており、またモルタルの特性を特に捉えていると考えられ、充

填性以外の施工性能を評価するうえでも有効な手段である。例を挙げると、プレキャスト製品用のコンクリート配合のように、高強度・高粉体量のものに対して、振動締固め後の表面仕上げ性などを評価する手段として、適用できる可能性もあるのではないかと考えられる。

## 参考文献

- 1) 土木学会編：コンクリートライブラリー126，施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針（案），2007.3
- 2) 石井佑大，宇治公隆，上野敦:タンピング試験におけるワーカビリティの簡易評価方法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.37-42，2008
- 3) 土木学会編：コンクリート技術シリーズ 94，コンクリートの施工コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会会報告書，2011.5
- 4) 伊達重之，長谷川聖史，室賀陽一郎，辻幸和：モルタルの粘性に及ぼす分割練混ぜの効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.991-996，2005.7
- 5) 藤倉裕介，齋藤拓弥，橋本 紳一郎，伊達 重之：モルタルの静置，振動下のレオロジー特性が充填性能に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1093-1098，2015.7
- 6) 土木学会編：循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術，pp.46-57，2009.12

## 第4章 非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工性能に関する検討

### 4.1 概説

#### 4.1.1 はじめに

良質な天然骨材の採取が困難となった昨今，産業副産物由来の骨材の利用拡大が望まれている．産業副産物由来の骨材には，再生骨材や各種スラグ骨材などがあるが，それらは普通骨材（川砂利・川砂，碎石・砕砂など）と密度などの物性が大きく異なることもある．

なかでも非鉄スラグ細骨材は，絶乾密度が $3.0\sim 3.5\text{g/cm}^3$ 程度であり<sup>1), 2)</sup>，川砂利・川砂などの天然骨材や碎石・砕砂の密度（ $2.5\sim 2.7\text{g/cm}^3$ 程度）と比べて相当に大きい．従って，非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートは，重量コンクリートになりやすく，ダムや防波堤の施工に用いられてきた．最近ではその用途が拡大されつつあり，それに付随して土木学会編「フェロニッケルスラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針」および「銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針」の改訂が行われた<sup>1), 2)</sup>．

一方で，骨材の実績率や粒度分布などの物性とコンクリートの施工性能との関係についての研究は多々あるが，密度に着目してその施工性能を評価したものはブリーディングに関するもの以外では少ない．骨材の密度が大きい場合，ブリーディング量は多くなることが示されているように，骨材密度がフレッシュコンクリートの材料分離に影響するため，ブリーディング以外の施工性能にも影響を及ぼすことも考えられる．骨材種類が多様化するにつれ，骨材密度の幅も広がるため，骨材密度がコンクリートの施工性能に及ぼす影響について把握しておくことや，その施工性能を評価できる試験方法について抽出しておくことは，産業副産物由来の骨材の今後の発展にとっても必要である．

また四国地方では，環境保全の観点から川砂利・川砂や海砂の採取が禁止されており，現在では，代替材として硬質砂岩碎石・砕砂を使用することが多いが<sup>3)</sup>，これらを使用したコンクリートの乾燥収縮は大きいことが報告されている<sup>4), 5)</sup>．また，四国地方の硬質砂岩碎石は扁平した形であるため，施工においては間隙通過性の低下が懸念される．これらに対し，非鉄スラグ細骨材は吸水率が低いことなどから，乾燥収縮量を低減できることが示唆されており<sup>1), 2)</sup>，また種類によっては粒形が丸いため，施工性能にも寄与する可能性もある．従って，これらの使用により施工性能や硬化性状を向上できる可能性も考えられる．

以上を踏まえ本章では，非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工性能評価および評価試験方法について検討した．具体的には，非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートに対し，タンピング試験，加振ボックス充填試験を行い，さらに加振Lフロー試験を実施することで，振動下の変形性および間隙通過性の評価を行った．コンクリートは，非鉄スラグ細骨材の種類や混合率を変化させると共に，混合する普通骨材の種類として硬質砂岩碎石・砕砂と，吸水率や実績率の面からみて品質が良好と思われるもの（青梅産硬質砂岩碎石・君津産山砂）をそれぞれ使用し，非鉄スラグ細骨材と混合する骨材の影響も検討した．また，非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの基本的特性としてブリーディング性状や圧縮強度および乾燥収縮特性についても確認した．

#### 4.1.2 非鉄スラグ骨材について<sup>1), 2), 6)</sup>

非鉄スラグには，フェロニッケルスラグ，銅スラグ，鉛スラグがあり，それぞれコンク





写真 4.1 フェロニッケル細骨材 (FNS5)



写真 4.2 銅スラグ細骨材 (CUS2.5)

表 4.1 使用材料

種類	材料名：記号	物性など
結合材	普通ポルトランドセメント：C	密度：3.16g/cm <sup>3</sup> ，比表面積：3340cm <sup>2</sup> /g
細骨材	阿波市産 砂岩砕砂：S1	表乾密度：2.57g/cm <sup>3</sup> ，FM：2.31，吸水率：1.77%，実積率：66.6%
	君津産 山砂：S2	表乾密度：2.67g/cm <sup>3</sup> ，FM：2.45，吸水率：1.06%，実積率：68.6%
	大江山産 FNS：F1.2	表乾密度：3.08g/cm <sup>3</sup> ，FM：1.63，吸水率：0.31%，実積率：58.5%
	八戸産 FNS：F5.0	表乾密度：3.08g/cm <sup>3</sup> ，FM：2.70，吸水率：1.78%，実積率：67.4%
	東予産 CUS：C2.5a	表乾密度：3.60g/cm <sup>3</sup> ，FM：2.33，吸水率：0.11%，実積率：61.5%
	小名浜産 CUS：C2.5b	表乾密度：3.53g/cm <sup>3</sup> ，FM：2.33，吸水率：0.10%，実積率：65.8%
粗骨材	鳴門市産 砂岩砕石 5号：G1	表乾密度：2.57g/cm <sup>3</sup> ，FM：7.08，吸水率：1.62%，実積率：57.6%
	鳴門市産 砂岩砕石 6号：G2	表乾密度：2.57g/cm <sup>3</sup> ，FM：6.37，吸水率：1.60%，実積率：55.4%
	青梅産 砕石 5号：G3	表乾密度：2.66g/cm <sup>3</sup> ，FM：6.99，吸水率：0.51%，実積率：61.0%
	青梅産 砕石 6号：G4	表乾密度：2.65g/cm <sup>3</sup> ，FM：6.48，吸水率：0.34%，実積率：60.8%
混和剤	高性能AE減水剤：Ad1	ポリカルボン酸エーテル系化合物
	AE減水剤：Ad2	リグニンスルホン酸化合物とポリオールとの複合体
	AE剤：Ad3	アルキルエーテル系

リート用骨材として利用できるが、このうち特にフェロニッケルスラグ細・粗骨材（以下、FNSと称する）および銅スラグ細骨材（以下、CUSと称する）は最近、土木学会の施工指針の改訂も行われており、利用の促進が期待される。本実験で使用したFNSおよびCUSの外観を写真4.1および写真4.2に示す。非鉄スラグ細骨材の表面はガラス質で、また絶乾密度は3.0g/m<sup>3</sup>以上と高密度である。特に銅スラグ細骨材は絶乾密度が3.5g/m<sup>3</sup>にもなる。また、FNSおよびCUSは製造元や製法によってFNSではFNS1.2とFNS5、CUSではCUS2.5とCUS5に区分される。

## 4.2 実験概要

### 4.2.1 使用材料

使用材料の物性を表4.1に示す。FNSは製造者や製造方法の異なる2水準を使用した。FNS1.2に粒度区分されるもの（以下、F1.2と称する）はキルン水砕砂（大江山産）であり、粒形は角状で粒が細かいといった特徴がある。一方、FNS5として粒度区分されるもの（以下、F5.0と称する）は電炉風砕砂（八戸産）であり、比較的粒形が丸い。CUSはCUS2.5に

表 4.2 コンクリートの配合

配合シリーズ	配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )												混和剤(C×%)			
				W	C	S1	S2	F1.2	F5.0	C2.5a	C2.5b	G1	G2	G3	G4	Ad1	Ad2	Ad3	
1	N	47	45.5	165	350	788		0				378	567			0.8		0.005	
	F1.2-30		43			521		268				395	592			0.8		0.005	
	F5.0-50		46			398			477			374	561			0.5		0.002	
	F5.0-100		47			-			976			367	551			0.4		0.002	
	C2.5a-50		46			398				558		374	561		-	-	0.7		0.004
	C2.5a-100		48			-					1165	360	540				0.5		0.003
	C2.5b-50		46			398						547	374	561			0.7		0.004
	C2.5b-100		47									1118	367	551			0.5		0.003
2	N	47	45.5	165	350		819							390	586			0.5	
	F1.2-30		43				542	268						407	613			0.7	
	F5.0-50		46				414		477					386	581			0.5	
	F5.0-100		47				-		976					379	570			0.4	
	C2.5a-50		46				414			558				386	581			0.5	
	C2.5a-100		48				-				1165			372	559			0.5	
	C2.5b-50		46				414					547		386	581	0.2	0.4		
	C2.5b-100		47				-					1118		379	570	0.3	0.4		

粒度区分される，自溶炉水砕砂（東予産）および反射炉水砕砂（小名浜産）（以下，C2.5a およびC2.5bと称する）を使用した。

#### 4.2.2 コンクリートの配合条件

コンクリートの配合を表4.2に示す。硬質砂岩砕石および硬質砂岩砕砂を使用した配合シリーズ（以下，シリーズ1と称する）と青梅産砕石および君津産山砂を使用した配合シリーズ（以下，シリーズ2と称する）で比較検討した。シリーズ2で使用した普通骨材は，シリーズ1の普通骨材と比較して密度や吸水率，実積率が良好であり，その施工性能も良好なものと予想される。単位セメント量と目標スランプ値は「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針（案）」に示される単位セメント量とスランプの関係の確認図より<sup>7)</sup>，振動締固め性が良好と予測されるもの（単位セメント量：350kg/m<sup>3</sup>，スランプ10cm）とした。

F1.2を混合する場合は砕砂に対して30%の容積置換率とした。これは，F1.2は粒度が細かいため置換率を大きくすると他の配合と同一のスランプ・空気量を確保するには単位水量を増加させる必要があり，ブリーディング量などの配合間での比較が困難なためである。

F5.0，C2.5a，C2.5bはそれぞれ50%および100%容積置換した。

また，全配合で単位水量や単位セメント量，細・粗骨材容積を一定のもと混和剤の添加量の変化により，所要のスランプ・空気量となるようコンクリートの作製を試みた。そのため，混和剤として，AE減水剤と高性能AE減水剤を併用した。しかし，F1.2の混合によりスランプは減少する傾向，その他の非鉄スラグ骨材の混合ではスランプが増大する傾向にあり，また，混和剤のみでスランプを調整することが困難であった。そのため，s/aと混和剤の双方による調整を行って配合を決定した。また，粗骨材のブレンド比（容積比）は両シリーズ共に5号：6号=4：6とした。いずれの配合も目標スランプは10.0±1.0cm，目標空

気量は $5.0 \pm 1.0\%$ とした。

#### 4.2.3 試験方法

##### (1) フレッシュ性状試験

スランブ試験はJIS A 1101，空気量試験はJIS A 1128に準拠して実施し，また，コンクリートの練上がり温度も測定した。

##### (2) タンピング試験

タンピング試験は，前章（2章）と同様に実施した。

##### (3) 加振ボックス充填試験

加振ボックス充填試験による間隙通過性評価は，前章（2章）と同様に実施した。さらに本実験では，鉄筋間を通過する前後での硬化コンクリートの品質変化を評価することを目的として，加振終了直後，A室の上部・下部（以下，A上，A下と称する）と，B室の上部・下部（以下，B上，B下と称する）の4箇所からフレッシュコンクリートを採取した。採取した試料を用い，JIS A 1132に従って円柱試験体（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ）を各箇所1体ずつ作製し，圧縮強度試験を行ってボックス形容器内の試料の強度（以下，ボックス強度と称する）を算出した。なお，図4.1に示すように，A上・B上は表面側から，A下・B下はボックス形容器の底面側から試料を採取した。

##### (4) 加振Lフロー試験

本試験はL形容器（JSCE-F514），加振ボックス充填試験と同じ流動障害RⅡおよび棒状内部振動機を使用して実施した。試験の概要を図4.2に示す。流動障害を用いず，また振動モーターで加振させる手法は既に開発され，コンクリートの品質評価に用いられている<sup>8)9)</sup>。本実験では，鉄筋間の間隙通過性に対する評価を目的に，加振ボックス充填試験でも使用した流動障害R2を用いた。また加振は，棒状内部振動機を使用した。以下に試験要領を示す。

L形容器を防振マットの上へ水平に設置した。L形容器の開口部に流動障害R2を設置し，仕切りゲートを挿入した後，試料を3層に分けて詰めた。このとき，1層ごとに突き棒にて5回突いた。試料を詰めた後は，上面を均し，停止した状態の棒状内部振動機を試料

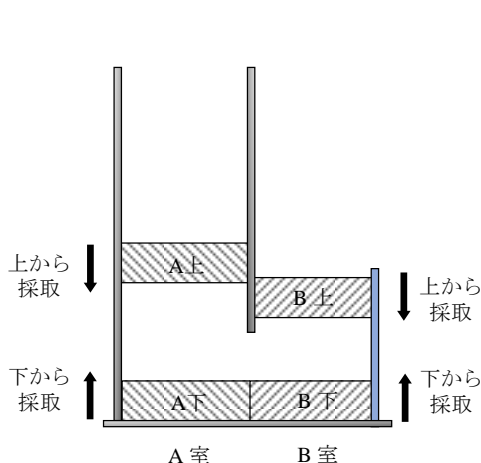


図 4.1 ボックス試験体試料の採取箇所

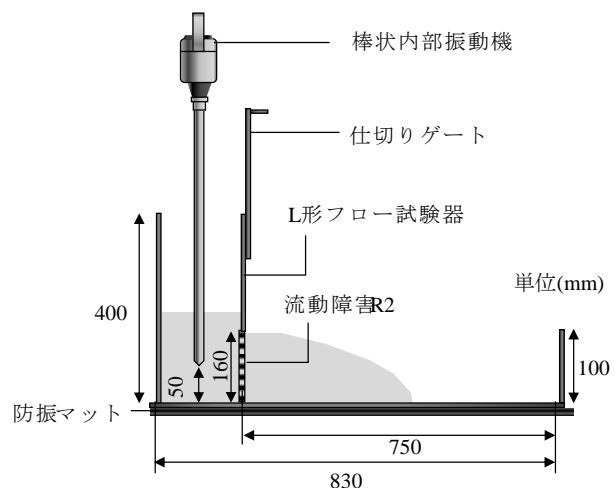


図 4.2 加振Lフロー試験の概要

投入側の中央に、底面からの高さが 50mm となるように挿入した。仕切りゲートを上げて加振を開始させた。フローが 150mm および 400mm に到達するのを目視で確認し、それぞれの距離に到達するまでの時間を計測して、式 (2) より加振 L フロー試験における間隙通過速度  $V_{L\text{フロー}}$  (mm/s) を算出した。

$$V_{L\text{フロー}}(\text{mm/s}) = \frac{400\text{mm} - 150\text{mm}}{T150(\text{s}) - T400(\text{s})} \quad (4.1)$$

ここに、T150：フロー150mm 到達時間 (s)，T400：フロー400mm 到達時間 (s)。

フローが400mmに到達した試料でも、流動停止するまで再振動を行った。なお、振動停止から再振動までは3～5秒程度であった。流動停止時のフローを加振Lフロー (mm) とした。

#### (5) ブリーディング試験

ブリーディング試験はJIS A 1123に準拠して実施した。

#### (6) 圧縮強度試験

ボックス試験体に対し、圧縮強度試験をJIS A 1108に準拠して実施した。試験体は水中養生を28日間行った。

#### (7) 長さ変化試験 (迅速法)

文献10)では、JIS A 1129-2「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法：コンタクトゲージ法」(以下、JIS法と称する)の1/4の日数で最終的な乾燥収縮量を把握できる長さ変化試験(迅速法)を提案している<sup>10)</sup>。本試験方法は、試験体を低温炉乾燥させることで、乾燥収縮を促進させる。以下に試験手順を示す。

角柱(100mm×100mm×400mm)の打設面を除いた両側面に対し、中央と中央から左右に100mm離れた箇所にコンタクトチップを貼付しこれを試験体(図4.3)とした。測定対象は中央から左右のコンタクトチップまでの距離とした。したがって一回の測定につき、片面2回、両面で計4回の測定を行った。ホイットモア式のひずみ計を用いて測定し、測定値は最小表示量である0.001mmまで読み、4箇所の平均値を長さとした。

試験の流れを図4.4に示す。まず、試験体を脱型した後、1週間の水中養生を行ったものを試験材齢0日として長さを測定した。その後、乾燥炉内で温度40℃で6日間、乾燥させ、1日間20℃環境下に静置してから測定する工程を試験材齢56日まで繰り返して実施した。また、長さ変化の測定とともに試験体の質量も測定した。

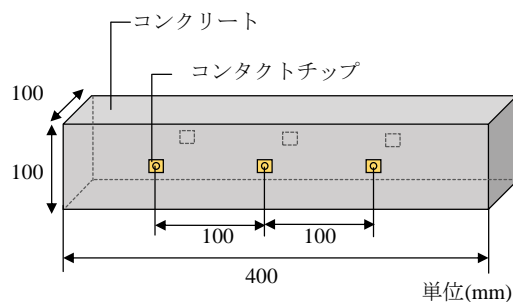


図 4.3 乾燥収縮試験体の概要

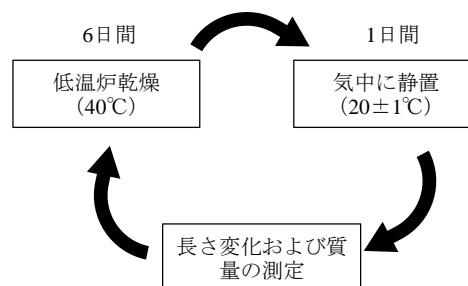


図 4.4 乾燥収縮試験のサイクル

表 4.3 フレッシュ性状試験結果

配合名	シリーズ1			シリーズ2		
	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(°C)	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(°C)
N	11.0	5.3	22.8	10.0	5.0	22.3
F1.2-30	11.0	4.5	22.3	9.5	5.0	22.6
F5.0-50	9.0	5.0	20.0	9.0	5.5	22.6
F5.0-100	10.0	4.7	20.7	11.0	5.5	22.3
C2.5a-50	10.5	5.5	22.6	10.0	5.0	21.5
C2.5a-100	9.0	5.5	20.2	10.0	6.0	21.9
C2.5b-50	10.0	6.0	22.4	10.0	6.0	23.1
C2.5b-100	10.0	4.5	22.3	11.0	5.5	23.1

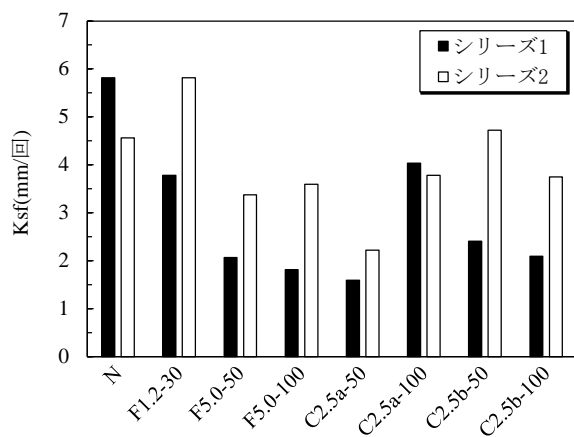


図 4.5 スランブフロー変形係数

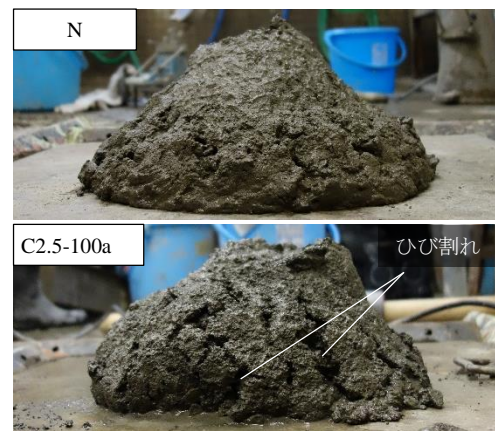


写真 4.3 タッピング試験状況(シリーズ1)

### 4.3 試験結果および考察

#### 4.3.1 フレッシュ性状試験結果

表4.3にフレッシュ性状試験結果を示す。いずれの配合も目標スランブ値(10.0±1.0cm)および目標空気量(5.0±1.0%)を満たした。また、CUSを100%用いた配合の空気量は、骨材修正係数1.0%を差し引いた空気量を示した。

#### 4.3.2 タンピング試験による振動下の変形性評価

図4.5にタンピング試験によるスランブフロー変形係数Ksfを示す。Ksfは、両シリーズとも概ね非鉄スラグ細骨材の混合によってNよりも低下する傾向にあったが、シリーズ2ではF1.2の混合によりNよりもKsfは大きくなった。これは、細骨材率が小さいため、実積率の大きい青梅産砕石を多く含んでいることが影響したと考えられる。また、シリーズ1では、C2.5a-100のKsfが他のCUS配合と比較して大きくなった。写真4.3にC2.5a-100(シリーズ1)の試験状況の一例として、タンピング回数32回するときの形状を示す。Nではスランブ下部にひび割れが無いのに対し、C2.5a-100ではスランブ下部にひび割れを生じた。このような場合、ひび割れによってスランブ下部が膨らむため見掛け上のスランブフローが大きくなる。このため、C2.5a-100ではKsfが大きくなったと考えられる。その他の配合についてもひび割

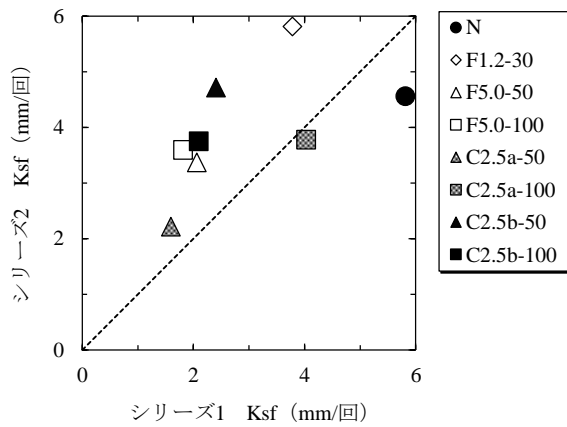


図 4.6 シリーズ 1 とシリーズ 2 の Ksf の関係

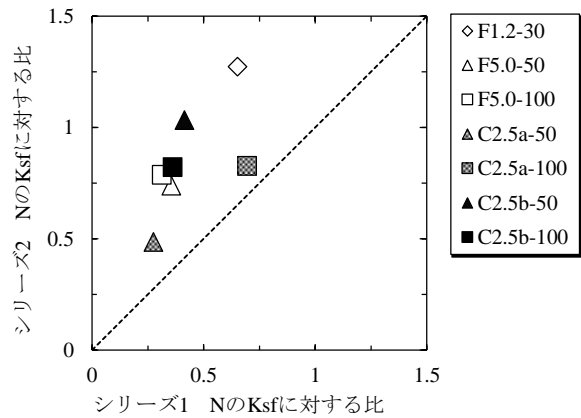


図 4.7 N に対する FNS・CUS 配合の Ksf の比

れが生じているものもあったが、C2.5a-100ほど大きなひび割れは確認されなかった。

非鉄スラグ細骨材の混合による自重の増大によって、コンクリートに働くせん断応力は大きくなる一方で、垂直抗力も増大することから変形に対する摩擦も増大すると考えられる。スランプ試験のように、スランプコーンによってコンクリートの変形を拘束した不安定な状態（変形しようとする状態）から変形する場合には、自重の増大によって変形しやすくなると考えられる。これは、本実験でF1.2を除く非鉄スラグ細骨材を混合した配合ではNと同等のスランプを得るために、s/aを増大させる必要があったことから明らかである。この場合、一度変形したコンクリートに働く摩擦力は動的な摩擦力、すなわち動摩擦力に近いと考えられる。

一方、タンピング試験のようにすでにスランプした静止状態から、タンピングによる振動によってコンクリートを変形させるときには、短時間で変形が停止するためそのときの摩擦力は静的な摩擦力、すなわち静止摩擦力が働く。一般に、静止摩擦力は動摩擦力よりも大きい。また変形後のコンクリートではスランプ板との接触面が大きくなることから、摩擦力はより大きくなる。これらの影響から、非鉄スラグ細骨材を混合した配合のksfが小さい傾向にあったと考えられる。また、C2.5a-100（シリーズ1）のスランプ下部のひび割れはタンピングによって入力された振動エネルギーが変形として消費されなかったため表れたと考えられる。

図4.6にシリーズ1とシリーズ2のKsfの関係を示す。全体的に図中の破線（傾き=1）よりも上側にプロットが分布していることから分かるように、シリーズ2の方がKsfは大きくなる傾向にあった。図4.7に各シリーズにおけるNのKsfに対するFNS配合およびCUS配合のKsfの比を示す。すべてのプロットが破線より上側に分布していることから、Nに対するFNS配合およびCUS配合のKsfの比はシリーズ2の方が大きいことが分かる。これは、シリーズ2の方が非鉄スラグ細骨材の混合による変形性の低下の影響を受けにくいことを意味する。この要因としては、シリーズ2の普通骨材の方がシリーズ1の普通骨材よりも実積率が大きく、丸みを帯びているため、せん断に対する抵抗が小さいことなどが考えられる。

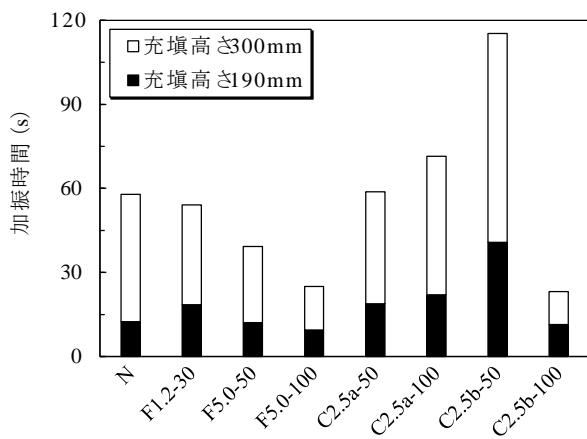


図 4.8 加振時間 (シリーズ 1)

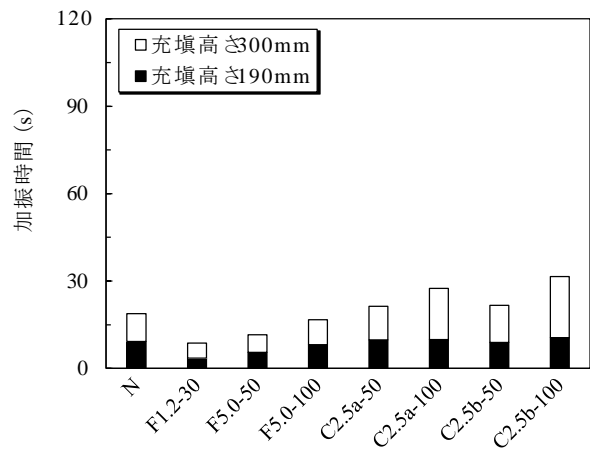


図 4.9 加振時間 (シリーズ 2)

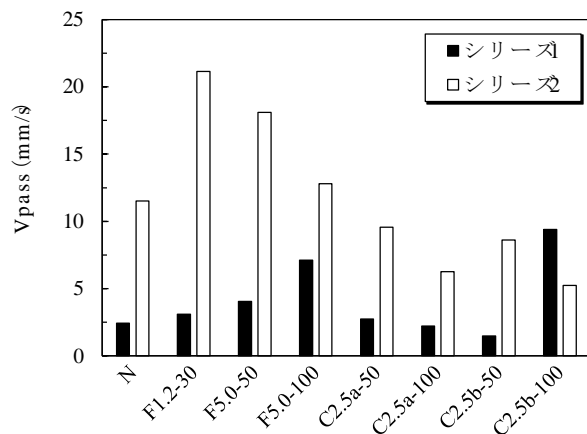


図 4.10 各種配合における Vpass

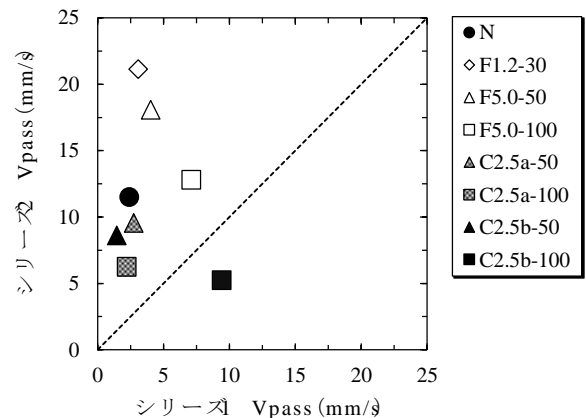


図 4.11 各シリーズにおける Vpass の関係

#### 4.3.3 加振ボックス充填試験による間隙通過性評価

図4.8と図4.9に加振ボックス充填試験における充填高さ190mmおよび300mm到達までの加振時間を示す。シリーズ2と比較してシリーズ1では、全体的に加振時間は長くなる傾向にあった。特に、充填条件が厳しくなる充填高さ190mmから300mmまでの加振時間が相当に長くなった。図4.10に各種配合における間隙通過速度Vpass、図4.11にシリーズ1とシリーズ2におけるVpassの関係を示す。図3.7によると、ほぼ同一のスランプであるにも関わらず、NのVpassはシリーズ1では相当に遅く、シリーズ2の1/4程度となった。図4.11によると、全体的に、図中の破線(傾き=1)よりも上側にプロットが分布していることから、FNS配合およびCUS配合においても概ねシリーズ1に比べてシリーズ2の方がVpassは速いといえる。

図4.12に各シリーズのNのVpassに対するFNS配合とCUS配合のVpassの比を示す。プロットが全体的に破線の下側に分布していることから、シリーズ1の方が全体的にNに対する非鉄スラグ細骨材を混合した配合のVpassの比が大きいといえる。非鉄スラグ細骨材の種類別に見ると、FNS配合では、いずれのシリーズもNのVpassに対するFNS配合のVpassの比は1よりも大きいことから、FNSの混合によって間隙通過性が向上することが分かる。また、注目すべき点として、シリーズ1ではFNSの混合率の増加とともにVpassは速くなったのに対して、シリーズ2ではFNSの混合率が増加するとともに遅くなっており、相反する結果となっ



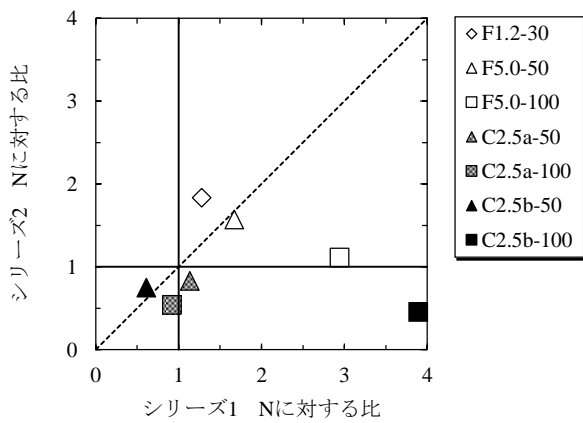


図 4.12 N に対する FNS・CUS 配合の  $V_{pass}$  の比

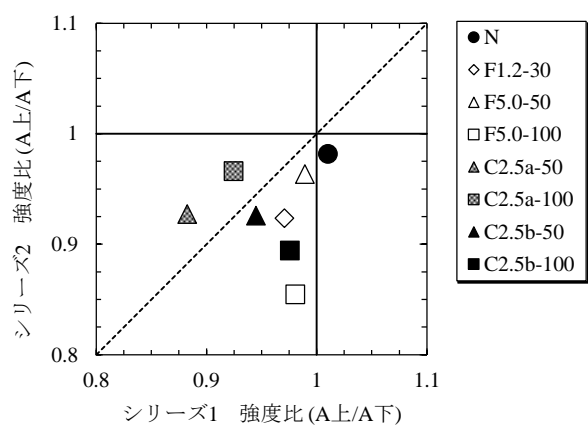


図 4.13 各シリーズの強度比 (A 上/A 下) の関係



写真 4.4 粗骨材の外観  
(上：シリーズ 1, 下：シリーズ 2)

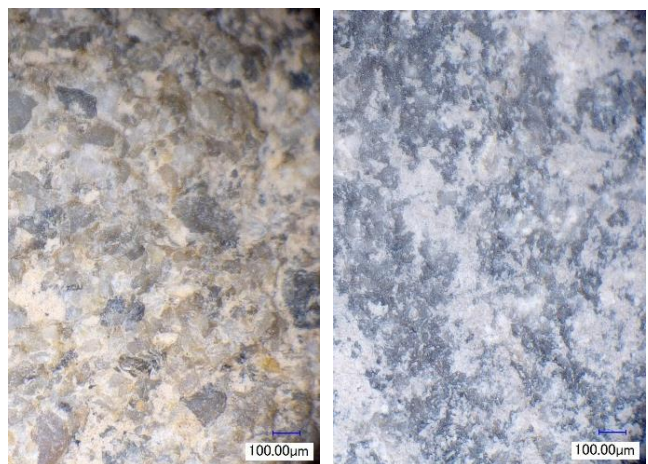


写真 4.5 粗骨材表面の様子  
(左：シリーズ 1, 右：シリーズ 2)

た。これらは、FNSの種類やFNSと混合する普通骨材の種類によって最適な混合率が存在することを示唆する。CUS配合に着目すると、シリーズ2ではNに対する $V_{pass}$ の比が0.5~0.9程度の範囲に分布しており、CUSの混合によって間隙通過性が低下することが分かる。一方、シリーズ1では、CUS2.5aを混合した配合ではNに対する比がほぼ1であり、CUS2.5bを混合した配合では、0.6および4となった。シリーズ2と比べてシリーズ1では、CUSの混合によって $V_{pass}$ は低下しにくい傾向にあった。

以上より、FNSの混合はその種類や混合する普通骨材の種類によらず、間隙通過性の向上が示された。また、CUSの混合により間隙通過性は低下する傾向にあったが、良質な普通骨材との混合では砂岩碎石・砂岩砕砂と混合した場合よりも全体的に間隙通過性は高い傾向にあった。

図4.13にシリーズ1とシリーズ2のA下に対するA上の強度比（以下、強度比 (A上/A下) と称する）の関係を示す。シリーズ1のNを除き、強度比 (A上/A下) は1よりも小さくなった。これは、加振によって水が上昇し、上部ほど水セメント比が大きくなったためと考えられる。全体的に図中の破線よりも下側にプロットが集中していることから、シリーズ1の



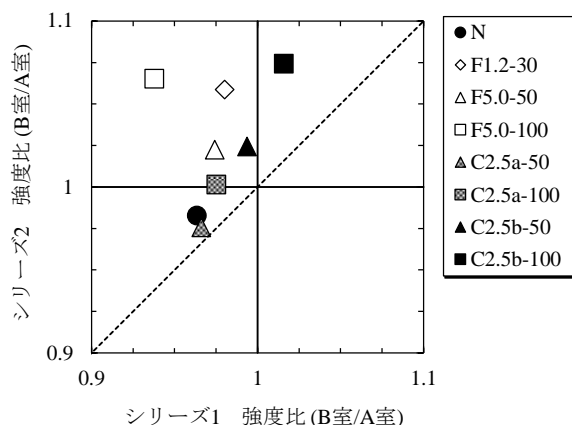


図 4.14 各シリーズの強度比 (B 室/A 室) の関係

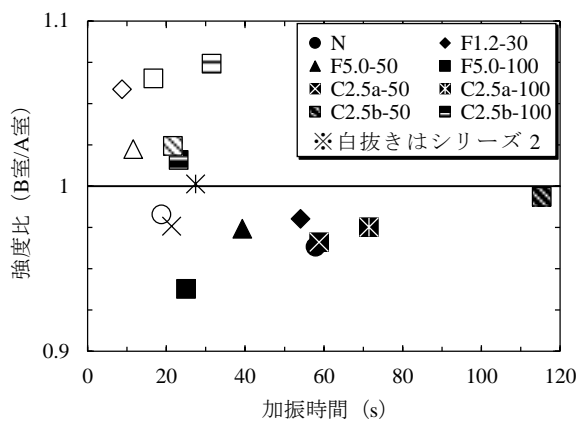


図 4.15 加振時間と強度比 (B 室/A 室) の関係

方が強度比 (A 上/A 下) が大きい傾向にある。加振時間は全体的にシリーズ1の方が長いにも関わらず、水の上昇は少ないと考えられる。写真4.4および写真4.5に各シリーズの粗骨材の外観と表面の様子を示す。また、写真4.5は、マイクروسコープで撮影 (倍率50倍) した。シリーズ1の砕石は、シリーズ2の砕石と比較して扁平した形状をしており、表面は粗く、また多くの微粒分が付着している。このような骨材表面の粗さや微粒分の付着によって骨材表面の保水性が高いことや、扁平した形状から骨材間の衝突が多く分散性が低いこと、密度がシリーズ2の砕石よりも小さく沈降しにくいことなどが影響して、シリーズ1では水の上昇が少なかったと考えられる。また、いずれのシリーズも、非鉄スラグ細骨材の混合によってNよりも強度比 (A 上/A 下) が小さくなる傾向にあった。これは、非鉄スラグ細骨材の密度が大きく、沈降しやすいことや、CUSでは表面がガラス質であることなどから水が多く上昇したためと考えられる。

図4.14にA室の平均強度 (A 上とA 下の平均) に対するB室の平均強度 (B 上とB 下の平均) の比 (以下、強度比 (B 室/A 室) と称する) を示す。いずれのプロットも図中の破線 (傾き=1, 切片=0) より上側に分布していることから、シリーズ1よりもシリーズ2の方が強度比 (B 室/A 室) は大きいことが分かる。また、シリーズ2では強度比 (B 室/A 室) が概ね1以上となる傾向にあった。すなわち、鉄筋通過前のコンクリートよりも鉄筋通過後のコンクリートの強度の方が大きい傾向となった。これは、鉄筋通過後のコンクリートの水セメント比が減少したことを示唆するものと考えられる。前述のように、シリーズ2ではシリーズ1よりも加振によって水が上昇しやすいと考えられ、相対的に下部のコンクリートほど水が少ないことになるため、鉄筋通過後のコンクリートは水セメント比が小さくなったと考えられる。また、非鉄スラグ細骨材を使用した配合ではNよりも強度比 (B 室/A 室) が大きい傾向にあった。これより、非鉄スラグ細骨材の混合によって、無混合よりも鉄筋通過後のコンクリートの強度は低下しにくい可能性がある。

図4.15に加振時間と強度比 (B 室/A 室) の関係を示す。強度比 (B 室/A 室) は、0.95~1.05程度の範囲で分布し、あまり大きな変動はなかったが、強度比 (B 室/A 室) は概ね、加振時間が短くなるとともに大きくなる傾向にあった。加振時間が短い配合、すなわち、間隙通

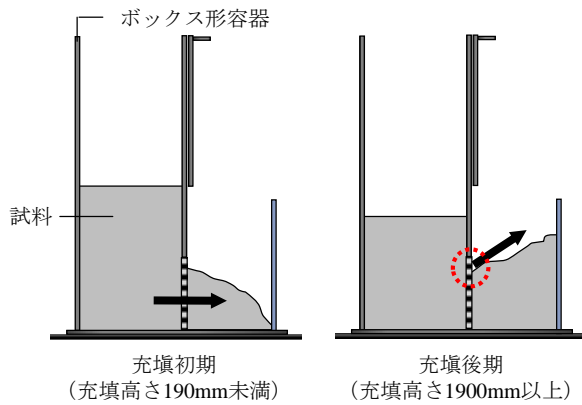


図 4.16 加振ボックス充填試験  
における流動方向

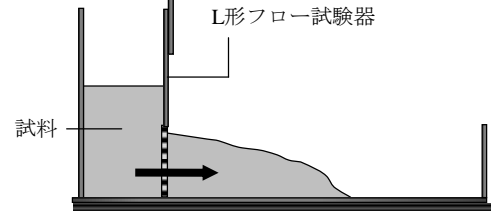


図 4.17 加振Lフロー試験  
における流動方向

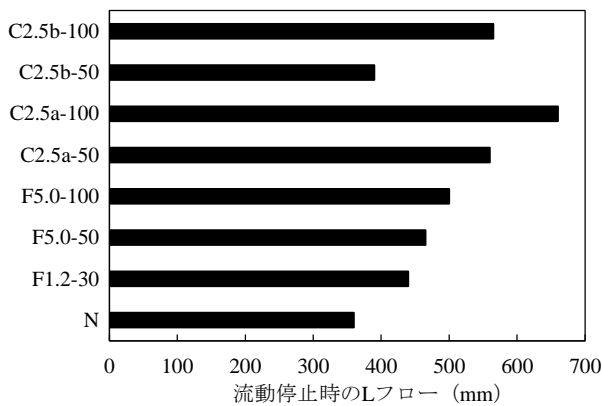


図 4.18 加振Lフロー

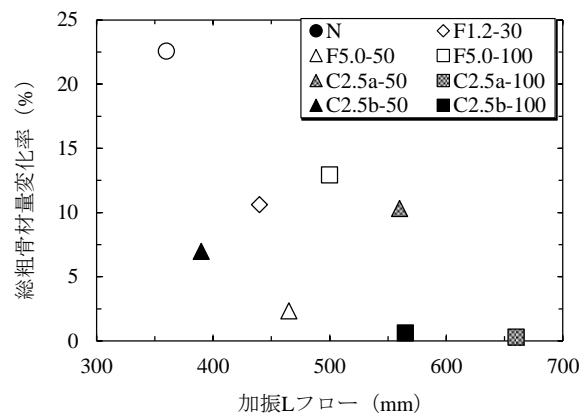


図 4.19 加振Lフローと総粗骨  
材量変化率の関係

過性が良好な配合では加振によって鉄筋間を通過するコンクリートにセメントが多く含まれるため、鉄筋通過後の強度が大きくなったと考えられる。

#### 4.3.4 加振Lフロー試験による間隙通過性評価

加振ボックス充填試験は図4.16に示すように、充填後期（充填高さ190mm以降）では破線で囲む領域に形成される流入口から上向き方向に充填すると考えられることから、比較的厳しくて複雑な充填条件の中での評価となる。この条件の中では形成される流入口の大きさ・形状のばらつきなどの不安定性を含むため、非鉄スラグ細骨材の混合による影響のみに焦点を合わせることが難しい。また上向きに充填することから、密度の大きい非鉄スラグ細骨材は遷移しにくいと考えられるため、過少に評価している可能性も考えられる。そこで、図4.17に示すように、水平方向への流動に限定した単純な条件で間隙通過性を評価するため、加振Lフロー試験による評価をシリーズ1の配合を用いて試みた。

図4.18に加振Lフローを示す。加振Lフローは非鉄スラグ細骨材の混合率の増大と共に大きくなった。すなわち、非鉄スラグ細骨材の混合により、加振による流動が停止するまでの距離が長くなり、その距離は非鉄スラグ細骨材の混合率に依存する結果となった。

図 4.19 に加振Lフローと総粗骨材量変化率の関係を示す。Nと比較して、非鉄スラグ細

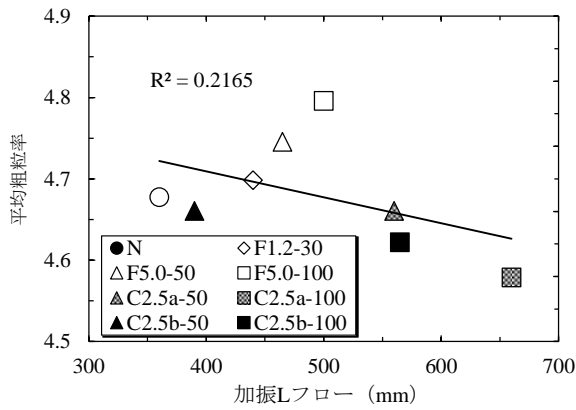


図 4.20 加振 L フローと平均粗粒率の関係

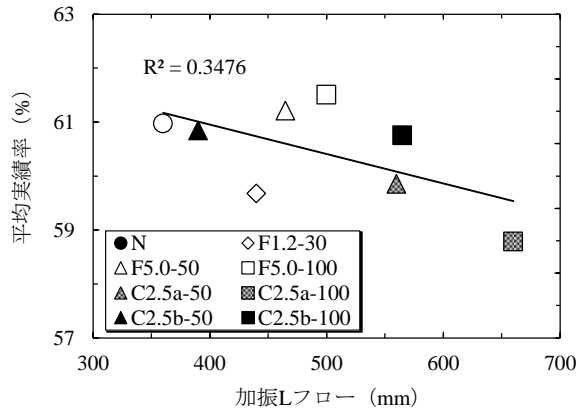


図 4.21 加振 L フローと平均実積率の関係

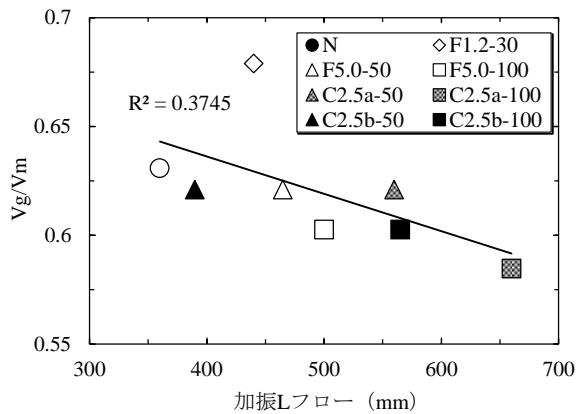


図 4.22 加振 L フローと Vg/Vm の関係

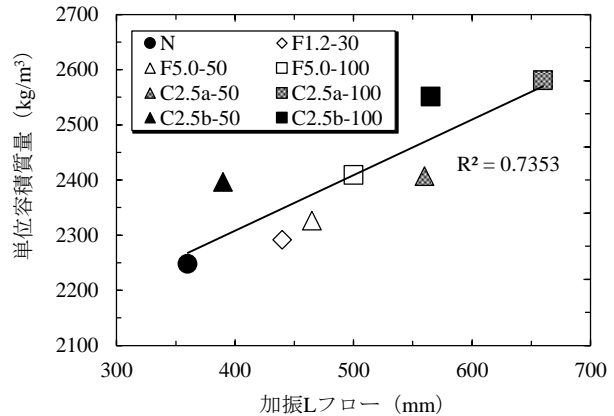


図 4.23 加振 L フローと単位容積質量の関係

骨材を混合したコンクリートでは、総粗骨材量変化率が小さくなった。また、全体的に総粗骨材量変化率が小さいほど加振 L フローは大きくなるといった右肩下りの傾向にあった。特に CUS を 100% 混合した配合 (C2.5a-100, C2.5b-100) では、総粗骨材量変化率が相対的に小さく、障害側と自由表面側で粗骨材量の変化がほとんど生じていない。これらから、非鉄スラグ細骨材の混合は振動下において粗骨材の流動を助長し、加振による流動が停止するまでの距離を増長させると考えられる。

非鉄スラグ細骨材の混合が加振 L フローに影響を与える要因について明らかとするために、骨材の粗粒率および実積率、粗骨材容積に対するモルタル容積の比 ( $V_g/V_m$ )、コンクリートの単位容積質量と加振 L フローとの関係について整理した。骨材の粗粒率および実積率については、骨材全体の容積を考慮して式 (4.2) より算出した平均粗粒率率および平均実積率を評価指標とした。

$$\text{平均吸水率}(\%) = \frac{\sum V_n \times \rho_n}{\sum V_n} \quad (4.2)$$

ここに、 $V_n$ : 各骨材の容積(l),  $\rho_n$ : 各骨材の物性 (粗粒率, 実積率 (%), 吸水率 (%))

図 4.20 から図 4.23 に配合からに要因と加振 L フローの関係を示す。コンクリートの単位容積質量と加振 L フローの関係の決定係数が 0.7353 となり、コンクリートの単位容積質量との

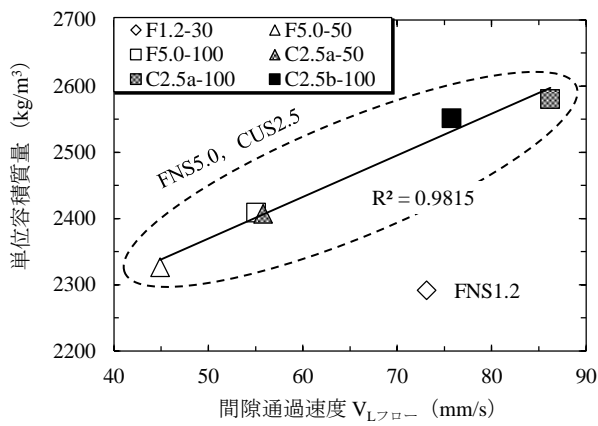


図 4.24  $V_{Lフロー}$  と単位容積質量の関係

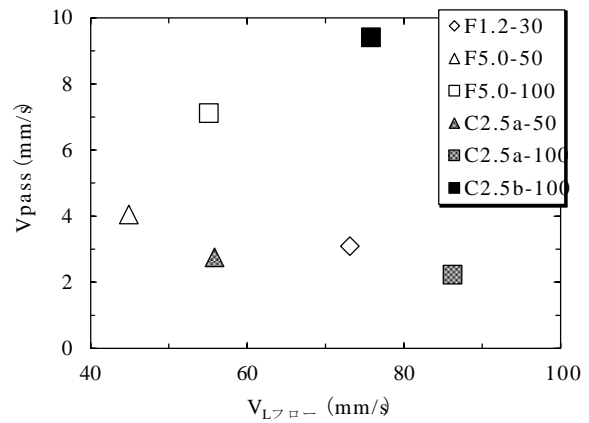


図 4.25  $V_{Lフロー}$  と  $V_{pass}$  の関係

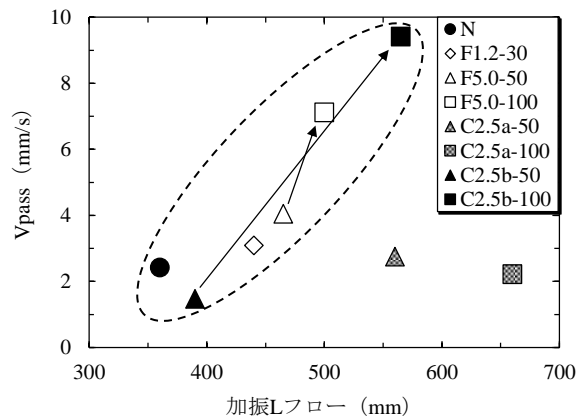


図 4.26  $V_{pass}$  と加振 L フローの関係

相関がもっとも強くなった。  $V_g/V_m$ との関係については、 F1.2-30を除くと相関が高くなるが、 F1.2-30を除いたとしてもその決定係数は0.6961であり、 コンクリートの単位容積質量ほどの相関は得られなかった。 一般に、  $V_g/V_m$ の増大、 骨材の実績率の低下および粗粒率の増大は、 鉄筋と骨材の衝突や骨材同士の衝突の頻度を増加させるため、 コンクリートの間隙通過性が低下する要因になる。 しかし、 本配合の範囲ではこれらの影響はあまり大きくなかった。 コンクリートの単位容積質量との相関が強くなった理由としては、 単位容積質量の増大により加振時にコンクリートへ働く慣性力が増大したためと考えられる。

図4.24にフロー速度  $V_{Lフロー}$  とコンクリートの単位容積質量の関係を示す。  $V_{Lフロー}$  は加振 L フローが150mmと400mmに到達した時の時間から算出したため、 400mmに到達しなかった配合 (NおよびCUS2.5b-50) は算出できなかった。 図中に破線で囲んだ、 FNS5.0およびCUSを混合した配合では、  $V_{Lフロー}$  とコンクリートの単位容積質量は正の相関関係にあり、 この相関はかなり強かった (寄与率0.98以上)。 しかし、 F1.2を混合した配合では傾向が異なった。 これより、 F1.2とその他の非鉄スラグ細骨材で間隙通過性が向上するメカニズムは異なると考えられる。 F1.2には普通細骨材と比べると粒が非常に細かいという特性がある。 フライアッシュを使用したコンクリートの間隙通過性に関する既往の研究で示されるように<sup>11), 12)</sup>、 細かい粒子を細骨材として用いることで骨材間の衝突や摩擦が低減して間隙通過性が向上するため、 FNS1.2ではこの影響が大きいのではないかと推察される。

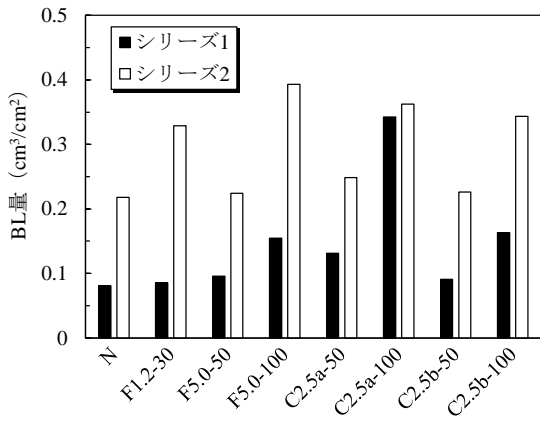


図 4.27 各種配合における BL 量

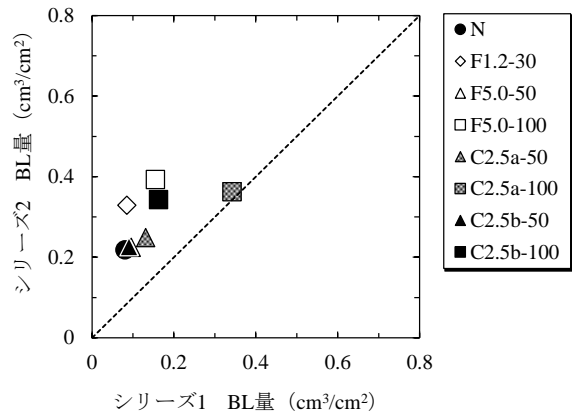


図 4.28 各シリーズの BL 量の関係

図4.25に $V_{Lフロー}$ と $V_{pass}$ の関係を示す。 $V_{Lフロー}$ と $V_{pass}$ に相関関係は見受けられなかった。これは、流動条件が異なるのに加え、 $V_{Lフロー}$ は流動の序盤から中盤にかけての速度であり、もっとも速くなる部分であるのに対し、 $V_{pass}$ は充填条件が厳しくなる終盤の部分の速度であるためと考えられる。図4.26に示す、加振ボックス充填試験の $V_{pass}$ と加振Lフローの関係では、破線で囲んだ配合においては、 $V_{pass}$ と加振Lフローに正の相関関係が見られた。また同じ種類の非鉄スラグ細骨材では、図中に矢印で示すように、混合率の増大とともに $V_{pass}$ と加振Lフローが増大した。一方、C2.5aを混合した配合では、加振Lフローは相当に大きいにも関わらず、 $V_{pass}$ は比較的に遅い。これより、水平方向に対する間隙通過性と上向き方向に対する間隙通過性は必ずしも相関しないと考えられる。

加振ボックス充填試験と加振Lフロー試験の結果を踏まえて間隙通過性・間隙通過性について整理する。非鉄スラグ細骨材の混合により単位容積質量が大きくなるため、コンクリートに働く慣性力は増大し、水平方向へ流動する際の間隙通過性は良好となった。しかし、鉛直方向への間隙通過性は必ずしも向上しなかった。F5.0を混合した場合、より厳しい流動条件である鉛直方向への間隙通過性も向上したため、鉛直方向では骨材の密度だけでなく、形状や粒度などの影響も大きいと考えられる。流動方向によって非鉄スラグ細骨材の種類やその混合率による影響は相違すると考えられる。

#### 4.3.5 ブリーディング特性の検討

図4.27に各種配合におけるブリーディング量（以下、BL量と称する）を示す。いずれのシリーズもBL量は非鉄スラグ細骨材の混合によってNよりも大きくなった。また、同じ種類の非鉄スラグ細骨材を混合した場合、混合率の増大とともにBL量は大きくなった。図4.28にシリーズ1とシリーズ2のBL量の関係を示す。図中の破線（傾き=1）より上側に、すべてのプロットが分布していることから分かるように、シリーズ2よりもシリーズ1の方がBL量は小さくなった。非鉄スラグ細骨材を100%混合した場合においてもシリーズ1の方がBL量は小さいことから、砂岩碎石によるBL量の抑制効果が特に大きいと考えられ、非鉄スラグ細骨材の種類によってはシリーズ2の半分程度に抑制された。前節でも示したように、シリーズ1の砂岩碎石はシリーズ2の碎石よりも表面が粗く、保水性が高いことや、シリーズ2の碎石よりも密度が小さいため沈降しにくいことなどによりBL量が小さくなったと考

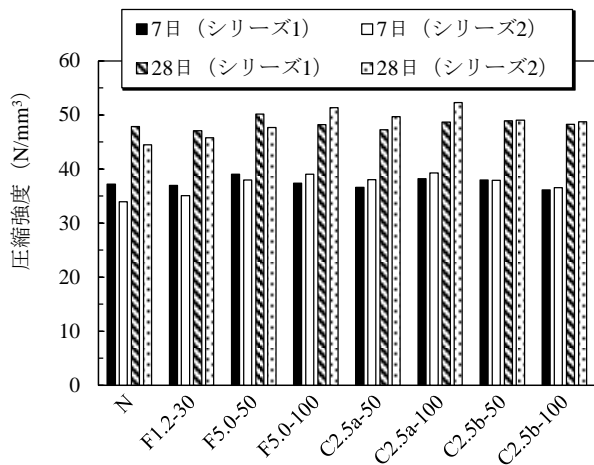


図 4.29 圧縮強度

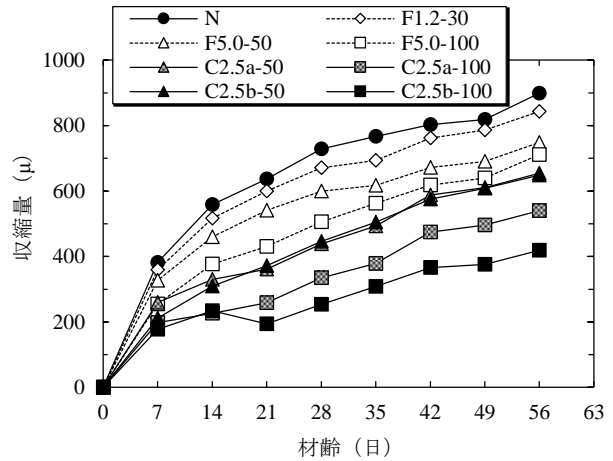


図 4.30 乾燥収縮量と材齢の関係 (シリーズ 1)

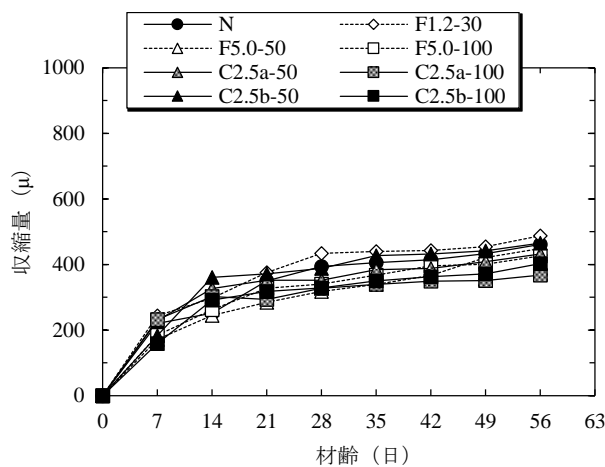


図 4.31 乾燥収縮量と材齢の関係 (シリーズ 2)

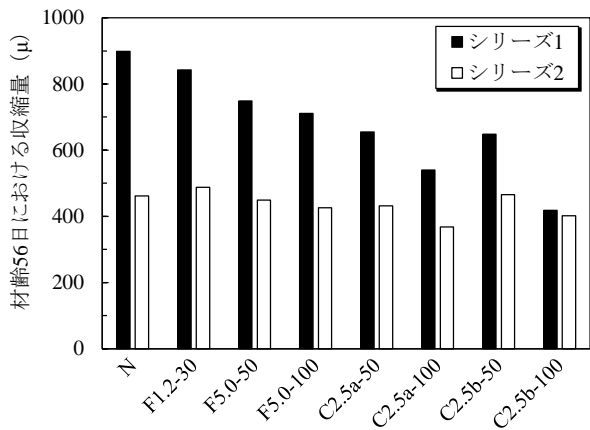


図 4.32 乾燥収縮量

えられる。以上より、非鉄スラグ細骨材の混合率の増加とともにBL量は増加するが、砂岩砕石と混合した場合、非鉄スラグ細骨材を100%使用してもBL量は比較的小さかった。

#### 4.3.6 硬化コンクリートの性状に関する検討

##### (1) 圧縮強度特性に関する検討

図4.29に圧縮強度試験結果を示す。圧縮強度はいずれのシリーズも非鉄スラグ細骨材の混合による大きな影響はなく、いずれの配合も同程度であった。これらの傾向は、施工指針に示される川砂利・川砂と混合使用した場合と同じである<sup>5), 6)</sup>。

##### (2) 乾燥収縮特性に関する検討

図4.30および図4.31に材齢と乾燥収縮量の関係、図4.32に材齢56日における乾燥収縮量を示す。シリーズ1と比較してシリーズ2では、同一配合・材齢における収縮量は小さくなる傾向にあり、これは質量減少率においても同様であった。非鉄スラグ骨材の混合による影響に着目すると、シリーズ1では非鉄スラグ細骨材を混合した配合ではNよりも同一材齢における収縮量は小さくなった。また、同じ種類の非鉄スラグ細骨材の混合では、その混合率が大きいほど乾燥収縮量は小さくなった。特に、CUSの混合による収縮量の低減効果

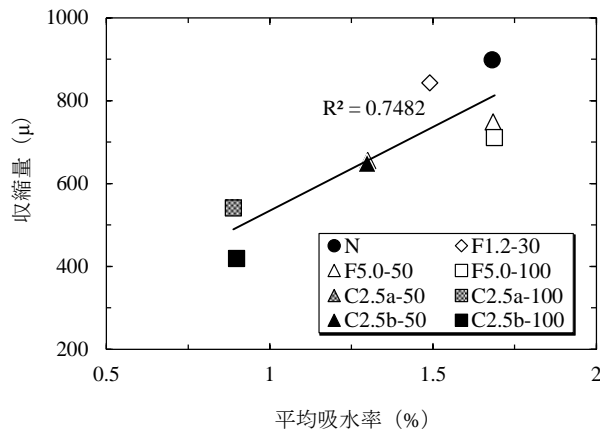


図 4.33 平均吸水率と乾燥収縮量の関係

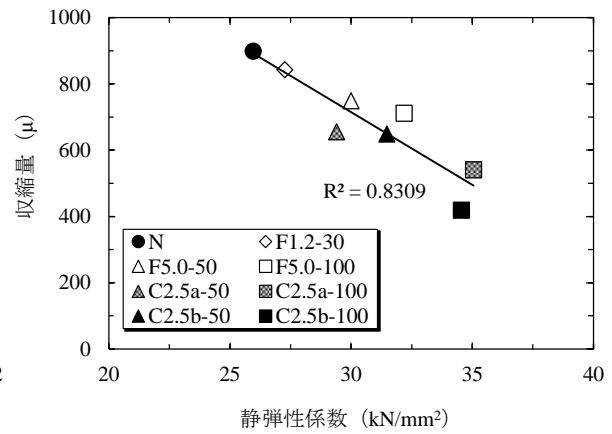


図 4.34 平均吸水率と弾性係数の関係

が大きく、100%混合した配合の材齢56日における乾燥収縮量はNの半分近くまで減少したのもあった。シリーズ2においても、材齢56日における乾燥収縮量はCUSを100%混合した場合にNよりも若干減少したが、シリーズ1ほどの明確な差はなかった。

以上から、砂岩碎石・砂岩砕砂に非鉄スラグ細骨材を混合することで、効果的に乾燥収縮量の抑制を図ることが可能であり、その抑制量は非鉄スラグ細骨材の混合率に依存することが示された。

乾燥収縮に影響を及ぼす骨材の要因としては、骨材の吸水率や静弾性係数などが考えられる。そこで、骨材全体の容積を考慮して式(4.2)より算出した、平均吸水率<sup>11)</sup>と収縮量の関係およびコンクリートの静弾性係数と収縮量との関係について整理した。

図4.33にシリーズ1における平均吸水率と終局収縮量(材齢56日)の関係、図4.34にシリーズ1における終局収縮量(材齢56日)と静弾性係数(材齢28日)の関係を示す。平均吸水率が小さくなるほど、また、静弾性係数が大きいほど収縮量は小さくなる傾向にあり、平均吸水率および静弾性係数の双方と相関関係が認められたが、特に静弾性係数との相関の方が強くなった。一般に、コンクリート硬化体の弾性係数が高いほど、コンクリートの収縮等の体積変化は小さい<sup>5)</sup>。コンクリート硬化体の弾性係数は、骨材とその周辺のセメントペーストの弾性係数に依存する。従って、弾性係数の大きいスラグ骨材を混合することによって、コンクリート硬化体の弾性係数が大きくなり、収縮への拘束効果が顕著に表れた結果といえる。

これより、非鉄スラグ細骨材の混合による収縮量の低減は、骨材の吸水率が低いことよりもコンクリートの静弾性係数が増大する影響の方が大きいと考えられる。

#### 4.4 まとめ

本章では、吸水率や実積率などの品質が良好ではない普通骨材と品質が良好な普通骨材のそれぞれに対し、非鉄スラグ細骨材を混合したコンクリートにおいて、普通骨材の種類の影響および非鉄スラグ細骨材の混合率による影響を、タンピング試験および加振ボックス充填試験によって評価した。本章のまとめを以下に示す。

- (1) タンピング試験により振動条件下における変形性を評価した。実積率が大きい良質な骨材と非鉄スラグ細骨材を混合した場合、硬質砂岩碎石・砕砂と混合した場合よりも変形性は大きくなった。非鉄スラグ細骨材の混合により変形性は低下し、特に、砂岩碎石および砂岩砕砂と混合したときに低下が大きかった。
- (2) 加振ボックス充填試験により間隙通過性を評価した。良質な普通骨材のみを使用した場合と比べて硬質砂岩碎石・砕砂のみを使用した場合の間隙通過速度は1/4程度となった。また、フェロニッケルスラグ細骨材を混合した場合、普通骨材およびフェロニッケルスラグ細骨材の種類によらず間隙通過性が向上した。銅スラグ細骨材を混合した場合、良質な普通骨材との混合では間隙通過性は低下した。一方、硬質砂岩碎石・砕砂との混合では、間隙通過性の低下が表れにくかった。
- (3) 非鉄スラグ細骨材を混合した配合では、無混合よりも鉄筋通過後のコンクリートの強度低下が小さくなった。特に、良質な普通骨材との混合では、鉄筋通過後の方が通過前よりも強度は大きい傾向にあった。
- (4) 加振Lフロー試験により硬質砂岩碎石・砕砂と混合した場合の水平方向への間隙通過性を変形量および間隙通過速度の双方から検討した。その結果、非鉄スラグ細骨材の混合率の増大とともに間隙通過性が向上した。これは、非鉄スラグ細骨材の混合率の増大に伴ってコンクリートの単位容積質量が増大し、コンクリートへ働く慣性力が大きくなったためと考えられる。
- (5) 加振ボックス充填試験では充填高さ190mm以降、上向きに充填するため密度の大きい非鉄スラグ細骨材を使用した場合に過少に評価する可能性がある。一方、加振Lフロー試験より得られた結果は、コンクリートの単位容積質量と関連付けることでその妥当性を説明できる。従って、密度が大きい骨材を使用したコンクリートの施工性能を評価する場合、加振ボックス試験よりも加振Lフロー試験の方が適することが示唆される。
- (6) 非鉄スラグ細骨材の混合率の増加と共にブリーディング量は多くなるが、砂岩碎石との混合ではブリーディング量を抑制できた。また、非鉄スラグ細骨材の混合により乾燥収縮量は低減した。非鉄スラグ細骨材コンクリートの乾燥収縮量は骨材の平均吸水率、コンクリートの静弾性係数と相関があったが、特に静弾性係と相関が強かった。



## 参考文献

- 1) 土木学会編：フェロニッケルスラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー146，2016.
- 2) 土木学会編：銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー147，2016.
- 3) 四国地区骨材資源対策検討会：四国地区骨材資源対策の基本方針について（概要），2003.
- 4) 日本コンクリート工学会編：コンクリートの収縮問題検討委員会 報告書，pp.15-23，2010.
- 5) A.M.Neville，三浦 尚：ネビルのコンクリートバイブル，技報堂，pp.530-536，2004.
- 6) 日本鉱業協会：建設資材としての非鉄スラグの有効利用方法について，日本鉱業協会HP，<http://kogyo-kyokai.blogdehp.ne.jp/>
- 7) 土木学会編：コンクリートライブラリー126，施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針（案），2007.
- 8) 向田隆史，木村 守：加振式L形フロー試験器の開発，土木学会中国史部第59回研究発表会，pp.337-378，2007.
- 9) 綾野 克紀ほか：委員会報告 品質試験方法と実施工時諸特性との相関性評価研究委員会，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.27-36，2009.
- 10) 井上裕貴ほか：骨材の吸水率がコンクリートの乾燥収縮特性に与える影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.473-478，2011.
- 11) 土木学会編：循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術，pp.46-57，2009.12
- 12) 御領園 悠司，渡辺 健，橋本 親典，伊藤 祐二：高強度および超高強度コンクリートを対象とした二次製品用コンクリートの振動充填性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1657-1662，2009.

## 第5章 舗装用コンクリートの施工性能評価に関する検討

### 5.1 概説

#### 5.1.1 はじめに

コンクリート舗装は高い耐久性を有している反面、初期コストが高くなることなどから、近年では、航空路やトンネル内の舗装などに適用範囲が限られてきた。しかし最近、原油価格の高騰によりアスファルト材料の安定供給が困難になることや、ライフサイクルコストの観点から、一般道への積極的な活用が望まれており、今後は適用範囲が拡大することが予測される<sup>1)</sup>。さらには、舗装用コンクリートに産業副産物骨材や混和材を混合することで、最終処分場の残余地不足を緩和するだけでなく、混合する材料によっては性状の向上が期待される。

最近では、コンクリート舗装の施工にスリップフォーム工法が多く用いられ、この工法に用いる舗装用コンクリートには振動締固め時は十分に流動し、加振を停止すると自立する性能(変形抵抗性)が強く求められる。舗装用コンクリートの施工性能評価試験として、振動台コンシステンシー試験やその他にも報告がいくつかあるが<sup>2) 3) 4)</sup>、試験室内での実施を想定したものが多い。そのため、施工現場では技術者の肌感覚によって定性的に評価されるのが実情である。

また本研究では、前章でも述べたように、フェロニッケルスラグ骨材の利用拡大についても視野に入れて検討を行っている。フェロニッケルスラグ骨材は絶対密度が $3.0\text{g/cm}^3$ 程度と高密度であり、また碎石砕砂などの普通骨材と比較して硬質である。したがって、コンクリート用骨材への混合により、アブレイジョン摩耗への抵抗性は向上することが示唆され、舗装のすり減りの低減が期待される。そのため、フェロニッケルスラグ骨材の舗装用コンクリートへの適用例は多く報告されている。しかしながら、舗装用スリップフォームコンクリートの施工性能や摩耗抵抗性に関する報告は皆無である。

以上を踏まえ本章では、施工現場での実施が可能であることも考慮したうえで、加振ボックス充填試験およびタンピング試験を採用し、フェロニッケルスラグを混合した舗装用スリップフォームコンクリート(スランプ $2.5\text{cm}$ および $6\text{cm}$ )の充填性および自立性の定量的な評価を試みた。また、硬化特性についても強度とアブレイジョン摩耗への抵抗性を評価した。

#### 5.1.2 スリップフォーム工法について<sup>5)</sup>

スリップフォーム工法とは、大規模なコンクリート舗装を施工する際に用いる工法で、固練りのコンクリート(スランプ $2.5\sim 6.0\text{cm}$ 程度)を敷き均した上を、スリップフォームペーパーで通過するように同一断面上を移動しながら連続的にコンクリートの振動締固めと成型を行う。主に小規模なコンクリート舗装の施工に用いられるセットフォーム工法とは、型枠を用いない点が異なる。従って、コンクリートはスリップフォームペーパーが通過した後のレールの形状を保ったまま自立しておく必要がある。

表 5.1 使用材料

材料名：記号	物性など
普通ポルトランドセメント：C	密度：3.16g/cm <sup>3</sup> ，比表面積：3340cm <sup>2</sup> /g
君津産山砂：S	表乾密度：2.67g/cm <sup>3</sup> ，FM：2.45，吸水率：1.06%，実積率：68.6%
大江山産フェロニッケルスラグ細骨材：FNS1.2	表乾密度：3.08g/cm <sup>3</sup> ，FM：1.63，吸水率：0.31%，実積率：58.5%
八戸産フェロニッケルスラグ細骨材：FNS5.0	表乾密度：3.08g/cm <sup>3</sup> ，FM：2.75，吸水率：1.78%，実積率：67.4%
青梅産砕石5号：G1	表乾密度：2.66g/cm <sup>3</sup> ，FM：6.99，吸水率：0.51%，実積率：61.0%
青梅産砕石6号：G2	表乾密度：2.65g/cm <sup>3</sup> ，FM：6.48，吸水率：0.34%，実積率：60.8%
フェロニッケルスラグ粗骨材：FNG	表乾密度：2.94g/cm <sup>3</sup> ，FM：6.51，吸水率：0.95%，実積率：61.1%
AE減水剤：Ad1	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
高性能AE減水剤：Ad2	ポリカルボン酸エーテル系化合物
AE剤：Ad3	アルキルエーテル系

表 5.2 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							混和剤 (C×mass%)						
			W	C	S	FNS 1.2	FNS 5.0	G1	G2	FNG	SL2.5		SL6.0			
											Ad1	Ad3	Ad2	Ad3		
N	40	37	140	350	734	-	-	515	740	-	0.4	0.005	0.8	0.002		
FNS1.2-30					514	254	-				0.5	0.008	0.85	0.004		
FNS5.0-50					367	-	424				0.25	0.009	0.8	0.005		
FNS5.0-100					-	-	847				0.4	0.008				
FNG-50					734	-	-				257	385			728	0.6
FNG-100					734	-	-				-	-	1456	0.7	0.005	0.005

## 5.2 実験概要

### 5.2.1 使用材料

使用材料の物性を表 4.1 に示す。細骨材は君津産山砂の他に、フェロニッケルスラグ細骨材（以下、FNS と称する）として大江山産 FNS（以下、FNS1.2 と称する）と八戸産 FNS（以下、FNS5.0 と称する）を使用した。それぞれの特徴として、FNS1.2 はキルン水砕砂であり、角状の粒形で粒が細かいのに対し、FNS5.0 は電炉風砕砂であり、粒形が丸い。粗骨材は青梅産砕石とフェロニッケル粗骨材（以下、FNG と称する）を使用した。

### 5.2.2 コンクリートの配合

表 4.2 にコンクリートの配合を示す。N はスリップフォーム工法による施工実績がある、スランプ 2.5cm，呼び強度（曲げ強度）4.5N/mm<sup>2</sup> の配合を参考にしたものである。FNS 配合は、N に対して FNS1.2 を細骨材に 30%容積置換したもの（配合名：FNS1.2-30）と、FNS5.0 を 50%および 100%容積置換したもの（配合名：FNS5.0-50，FNS5.0-100）の 3 水準とした。FNG 配合は N に対して粗骨材に FNG を 50%および 100%容積置換したもの（配合名：FNG-50，FNG-100）の 2 水準とした。

施工性能に関する検討では化学混和剤の添加量を調整して目標スランプ 2.5±1.0cm（以下、SL2.5 と称する）と 6.0±1.0cm（以下、SL6.0 と称する）の 2 水準のコンクリートを作製し、ス

ランプの違いによる影響を確認した。また、目標空気量はいずれも  $4.5 \pm 1.5\%$  とした。

### 5.2.3 試験方法

#### (1) スランプ試験および空気量試験

スランプ試験を JIS A 1101, 空気量試験を JIS A 1128 に準拠して実施した。また、コンクリートの練上がり温度を測定した。

#### (2) タンピング試験

舗装用コンクリートの自立性の評価を行うにあたり、タンピング試験を実施した。タンピング試験は前章で示した方法とタンピング回数以外は同様に実施した。タンピング 16 回ごとのスランプおよびスランプフローを測定し、タンピング回数が 112 回に到達したときに終了した。結果の整理については、前章と同様にスランプフロー変形係数  $K_{sf}$  (mm/回) を算出し、これを自立性の評価指標とした。

#### (3) 加振ボックス充填試験

加振ボックス充填試験は前章 (3 章, 4 章) と同様に実施したが、前章の試験方法とは流動障害を用いない点が異なる。これは、コンクリート舗装の施工では、鉄筋間をコンクリートが通過する過程があるものの、通常のコンクリート構造物の施工と異なり、配筋密度が小さいため、無筋コンクリートに近いと考えられるためである。また、稲葉らはこれまでに、スランプ 2.5cm 程度の普通骨材を用いた舗装用スリップフォームコンクリートの充填性を評価した。その結果、流動障害なしの加振ボックス充填試験での評価に妥当性があることを報告した<sup>9)</sup>。

分離状況の確認を行うにあたり、モルタルと粗骨材の分離を評価するため、前章と同様に加振後のボックス形容器 A 室下部と B 室上部の試料を採取して行った洗い分析試験 (JIS A 1112) により、A 室下部と B 室上部における単位粗骨材量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) を求めた。A 室下部と B 室上部の単位粗骨材量の相対変化率を総粗骨材量変化率 (%) とし、これをモルタルと粗骨材の分離状況の評価指標とした。

さらに前章と同様に、密度の大きい FNS を使用しているため、水と細骨材の分離についても評価することを目的に、図 5.1 に示すように、A 室の上部・中部・下部 (以降、A 上, A 中, A 下と称する) と、B 室の上部・下部 (B 上, B 下と称する) の 5 箇所から試料を採取して円

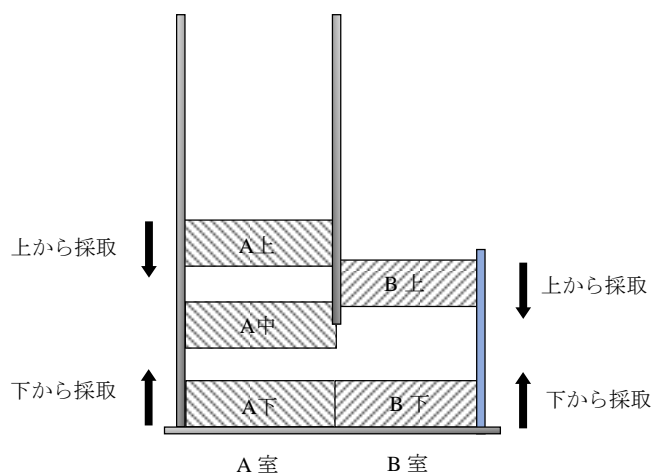


図 5.1 ボックス試験体試料の採取箇所

柱試験体を作製し、圧縮強度試験を行ってボックス容器内の試料の強度（以降、ボックス強度と称する）を算出した。

#### (4) 強度試験

練上がり後のコンクリートで試験体を作製して圧縮強度試験を JIS A 1108、曲げ強度試験を JIS A 1106 に準拠して実施した。また、試験体はいずれも 28 日間の水中養生を行った後、試験に供した。なお、本節の圧縮強度用試験体と前節のボックス強度用試験体は別途に作製したが、試験方法や養生条件は同じとした。

#### (5) アブレイジョン摩耗試験

本試験はドレッシングホイールのすべり作用によりコンクリート表面にアブレイジョン摩耗を生じさせるものである（写真-2）。本試験装置は、ASTM C779 を参考としたものであるが、ASTM C779 では、ドレッシングホイールを 3 体有するのに対して、本試験装置は 1 体のみである。また、本試験は主に表面のモルタルを摩耗させることが想定される。試験体は 28 日間水中養生した円盤状（直径 150mm、高さ 40mm）とした。また、試験体ごとで表面の粗さに差異が生じないように、試験体底面を試験面とした。試験の実施要領を以下に示す。

まず、試験開始前の試験体の質量を小数点以下 1 桁まで測定し、その後、ドレッシングホイールの回転速度を 56 (rpm) で時計回りに回転させ、開始から 30 分（回転数：1680 回）、60 分（回転数：3360 回）、90 分（回転数：5040 回）における試験体の質量を測定した。また試験を開始する前には、ドレッシングホイールに潤滑剤を噴霧した後にウエスで軽く拭いた。結果の整理については、試験前の質量  $W_1$  から各測定時間における試験体の質量を差し引いたものを摩耗損失量  $W_2$  (g) とし、以下の式(1)により摩耗損失率 (%) を算出した。

$$\text{摩耗損失率(\%)} = \frac{W_2}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

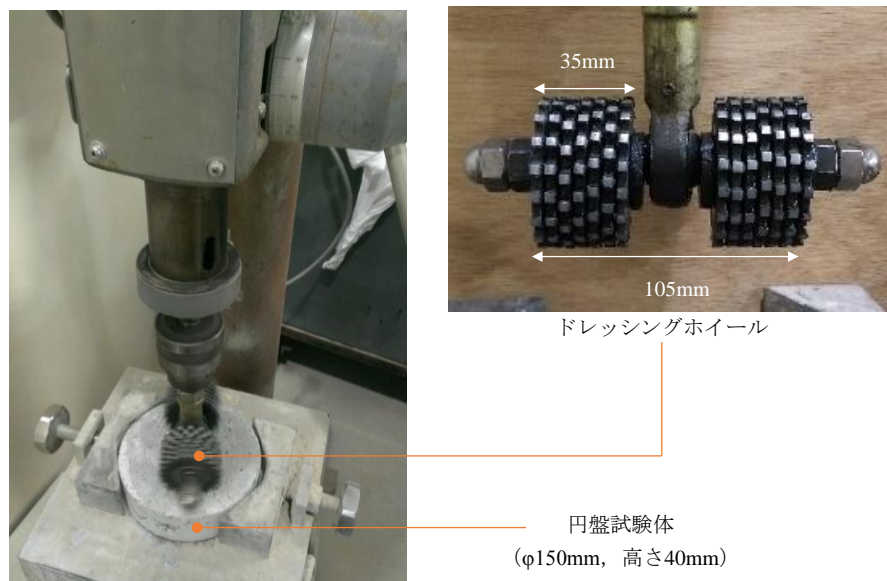


写真 5.1 アブレイジョン摩耗試験装置

表 5.3 フレッシュ性状試験結果

配合名	SL2.5			SL6.0		
	スランプ値 (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	スランプ値 (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
N	2.0	4.7	22.1	5.5	4.0	20.2
FNS1.2-30	1.5	4.6	19.8	5.5	5.0	20.4
FNS5.0-50	2.5	4.6	21.4	6.0	6.0	20.4
FNS5.0-100	1.5	5.3	20.9	6.0	5.3	20.0
FNG-50	2.0	4.2	20.8	5.5	4.0	21.0
FNG-100	2.5	4.4	20.2	5.0	4.6	21.2

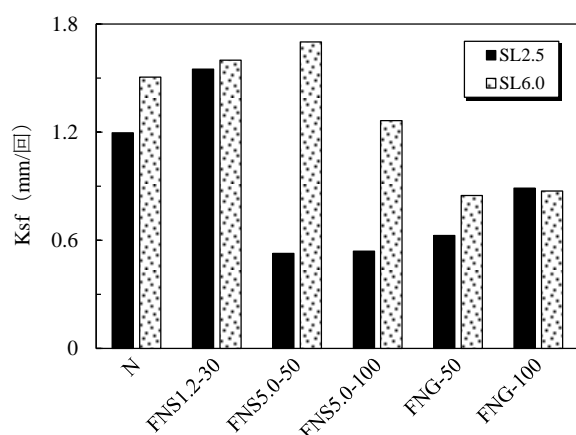


図 5.2 スランプフロー変形係数 Ksf

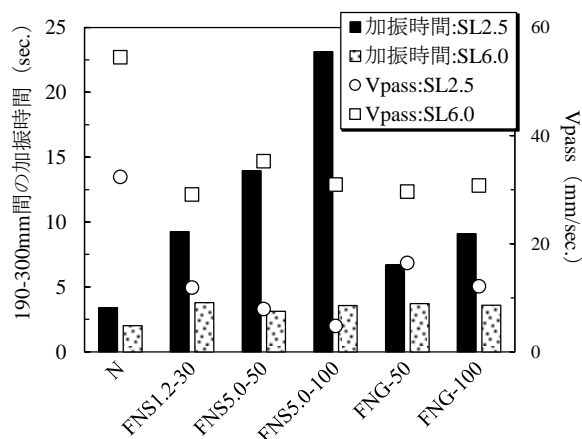


図 5.3 加振時間と Vpass

### 5.3 実験結果および考察

#### 5.3.1 フレッシュ性状試験結果

表 4.3 にフレッシュ性状試験結果を示す。すべての配合で目標スランプ値および空気量を満たしていることを確認した。

#### 5.3.2 タンピング試験による自立性評価

図 4.1 にスランプフロー変形係数 Ksf を示す。SL2.5 の場合、FNS1.2-30 では N よりも Ksf は大きくなったが、FNS5.0-50、FNS5.0-100、FNG-50 では 1/2 程度、FNG-100 では 2/3 程度となった。一方、SL6.0 の場合は FNS5.0-50 でも、N よりも若干大きくなり、また FNS5.0-100 は N より小さいものの、SL2.5 ほどの差はなかった。FNG 配合ではスランプに関係なく、Ksf は 1mm/回程度以下となり、FNS 配合と比べてスランプの影響を受けにくくなった。これは、FNS よりも FNG の方が骨材粒子あたりの自重が大きく、骨材自体の自立性が高いため、その影響がコンクリートの変形性にも強く表れたためと考えられる。

以上から、FNS の混合によりスランプが小さいときは自立性が向上するが、スランプが大きくなると効果は表れにくく、また、FNG を混合する場合はスランプに関係なくコンクリートの自立性を保持し易いと考えられる。

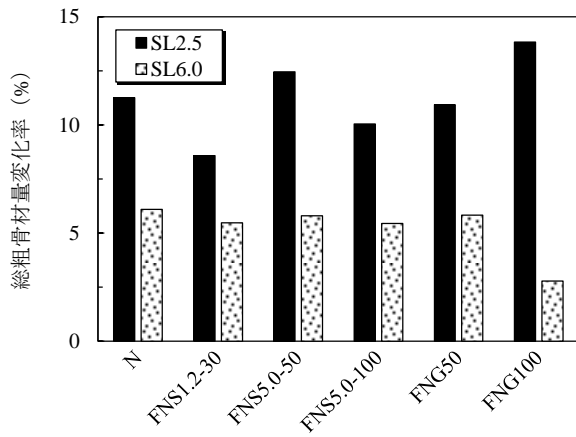


図 5.4 総粗骨材量変化率

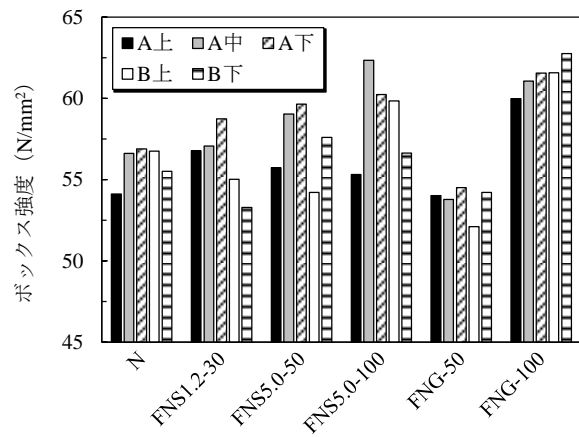


図 5.5 ボックス強度

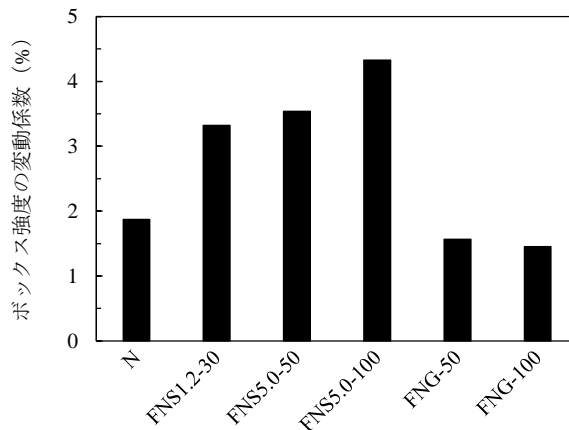


図 5.6 ボックス強度の変動係数

### 5.3.3 加振ボックス充填試験による充填性評価

図 4.2 に充填高さ 190mm から 300mm までの加振時間と  $V_{pass}$  を示す。スランプによらず、フェロニッケルスラグ骨材を混合した配合は、N よりも  $V_{pass}$  は遅くなった。各スランプの中で比較すると、SL6.0 の場合では、配合間での加振時間の差は小さく、2~4 秒程度であったのに対し、SL2.5 の場合では配合間で大きな差が見られ、3~24 秒程度の範囲で変化した。また SL2.5 の FNS 配合では、FNS の種類によらず、混合率の増加にともなって加振時間は長くなる傾向にあり、これは FNG 配合でも同様であった。フェロニッケルスラグ骨材の種類で比較すると、FNG 配合よりも FNS 配合の方が加振時間は長くなる傾向にあった。これらより、フェロニッケルスラグ骨材を混合することで充填性は低下し、またフェロニッケルスラグ骨材が充填性に与える影響はスランプが小さいほど大きく、さらにその影響は FNG よりも FNS の方が強いといえる。

図 5.4 に各種配合における総粗骨材量変化率を示す。SL2.5 の場合、いずれの配合も総粗骨材量変化率は、10%前後となった。一方、SL6.0 の総粗骨材量変化率は 3~6%程度となり、SL2.5 よりも小さくなった。これは SL6.0 の方が 300mm に到達するまでの加振時間が短く、モルタルと粗骨材の材料分離が生じにくくなったためと考えられる。また本実験結果は、普通コンクリート（スランプ 8cm 以上、単位セメント量 300kg/m<sup>3</sup>程度）に対して加振ボックス充填試験を行った既往の研究と比べると<sup>4)</sup>、総粗骨材量変化率は小さくなった。これは流動障害を使用していなく振動時間が短いこと、W/C が小さくかつ単位セメント量が比較的多いためと考えられる。

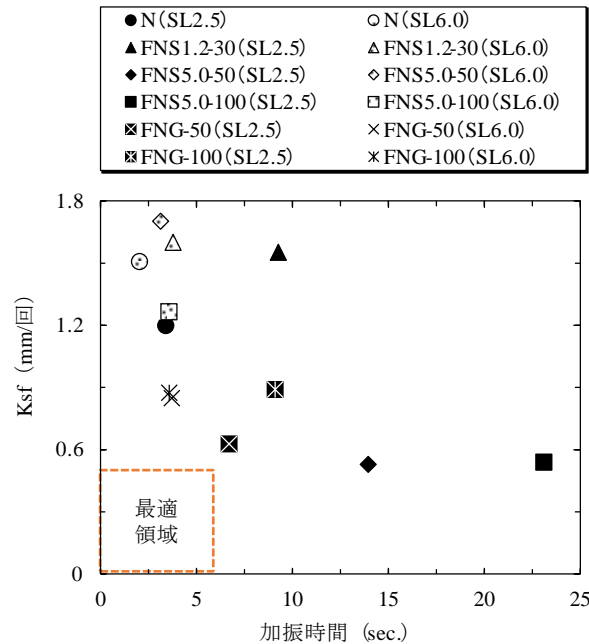


図 5.7 Ksf と 190mm から 300mm までの加振時間の関係

SL2.5 に対して、強度特性から材料分離を評価した結果を図 5.5 および図 5.6 に示す。図 4.4 に示すボックス強度は、いずれの配合も A 上では、A 中や A 下と比べて小さくなる傾向にあった。これは、加振によって水が上昇し、A 上の水セメント比が増大したためと考えられる。特に、加振時間が長くなった FNS5.0 を混合した配合では A 上と A 中や A 下との強度差が大きくなり、B 上と B 下の強度差も大きくなった。また、FNS1.2 を混合した場合には A 室側 3 箇所と B 室側 2 箇所との強度差が大きくなった。図 5.6 に示す A 上～B 下 5 箇所のボックス強度の変動係数は、FNS を多く混合するほど大きくなり、FNG の混合により低下の傾向となった。

総粗骨材量変化率とボックス強度の結果を踏まえたうえで SL2.5 における充填性を考察すると、モルタルと FNG の分離よりも水と FNS の分離の方が顕著であり、これが充填性により強く影響を与えたため、FNS 配合では FNG 配合よりも充填性が低下したと考えられる。

#### 5.3.4 自立性と充填性の総合評価

図 5.7 に Ksf と 190mm から 300mm までの加振時間の関係を示す。加振ボックス充填試験とタンピング試験にはある程度、正の相関関係が成り立つことが報告されており、基本的には振動下での変形性が大きいものは充填性も大きくなるとされる。これは本実験結果においても同様であり、Ksf が大きいものは加振時間が短くなる傾向にあった。また、本研究において、充填性と自立性に優れるコンクリートとは、図 5.7 において破線で囲んだ領域に示す原点の近くに分布するものであると考えられる。これを踏まえると、他の配合に比べて FNG 配合は、SL6.0 と SL2.5 のどちらも図中の原点近くに分布していることから、本実験の範囲内で相対比較を行った中では、理想的なコンクリートに近いと考えられる。しかし、実施工との比較が行えていないため、実施工と加振ボックス充填試験およびタンピング試験の関係について検討する必要がある。



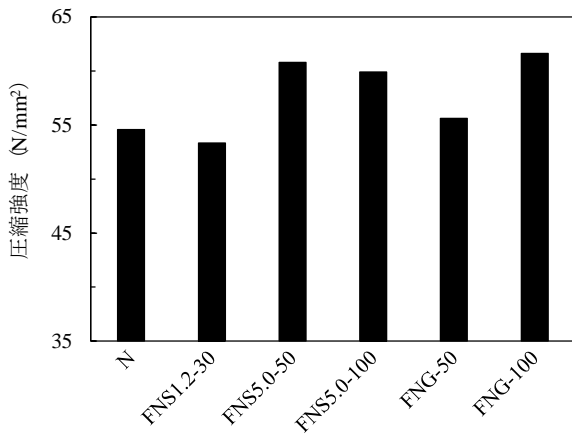


図 5.8 圧縮強度

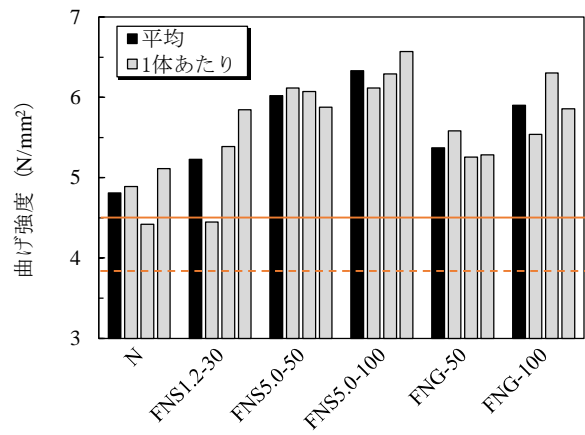


図 5.9 曲げ強度

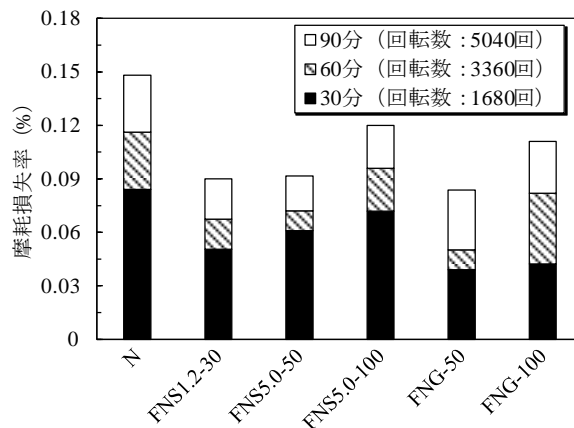


図 5.10 摩耗損失率

### 5.3.5 強度特性およびアブレーション摩耗に関する検討

#### (1) 強度試験結果

図 5.8 に材齢 28 日における圧縮強度を示す。圧縮強度は、種類によらずフェロニッケルスラグ骨材を混合した配合では N よりも大きくなる傾向にあったが、混合率による影響は明確ではなかった。図 5.9 に材齢 28 日における曲げ強度を示す。曲げ強度は、いずれの配合も試験体 3 体の平均が呼び強度  $4.5\text{N/mm}^2$  を満足するとともに、すべての試験体で呼び強度の 85% ( $3.83\text{N/mm}^2$ ) 以上となった。また、種類によらずフェロニッケルスラグ骨材の混合によって N よりも大きくなり、さらに、フェロニッケルスラグ骨材の混合率の増大とともに大きくなった。

フェロニッケルスラグ骨材を使用したコンクリートの強度に関しては、無混合のものとは比べて大きくなることを土木学会の指針でも示唆している<sup>7)</sup>。

#### (2) アブレーション摩耗試験結果

図 5.10 に各種配合における摩耗損失率を示す。種類によらず、フェロニッケルスラグ骨材の混合により、試験時間 30 分から 90 分にかけて摩耗損失率は N より小さくなった。なお、本試験は主に表面のモルタルを摩耗させるが、試験体作製時の振動締固めにより FNG が底面へ沈降するため、試験体底面を試験面とした本試験において、FNG 配合でも効果が表れたと思われる。また、フェロニッケルスラグ骨材の混合による影響を捉え易くするため、表面性状の影響を受けにくい試験体底面で試験を行ったが、実際の舗装では打設面が摩耗するため、表面性状

との関係についても今後は検討する必要がある。

フェロニッケルスラグ骨材の混合率に着目すると、混合率 100%の場合に摩耗減少率は増加傾向にあった。コンクリートの摩耗機構は複雑であり、実際の現象は複数の作用が生じるとされる<sup>8)</sup>。本試験はドレッシングホイールのすべり作用によりアブレイジョン摩耗を生じさせるものであるが、これにより摩耗粉が発生するため、摩耗粉が押込み作用を生じ、表面疲労摩耗も併発する可能性が示唆される。フェロニッケルスラグ骨材を 100%使用した配合で発生する摩耗粉は混合率がこれよりも低いものに比べ、硬質なもの（FNS および FNG）を多く含むと思われるため、摩耗粉による押込み作用が大きくなり、表面疲労とアブレイジョンの双方の摩耗が同時に生じ易くなったと推察される。したがって、フェロニッケルスラグ骨材の混合率には、最適値が存在すると考えられる。

#### 5.4 まとめ

本章では、フェロニッケルスラグ骨材を混合した舗装用スリップフォームコンクリート（スランプ 2.5cm および 6cm）の施工性能の評価を行った。以下に、本実験の範囲で得られた結果をまとめる。

- (1) 舗装用コンクリートを想定した固練りコンクリートにおいて、使用骨材の違いやその混合率の違いによる自立性および充填性の変化を、タンピング試験および流動障害を使用しない加振ボックス充填試験により評価することができた。
- (2) 細骨材、粗骨材によらず、フェロニッケルスラグ骨材を混合することで充填性は低下した。フェロニッケルスラグ骨材が充填性に与える影響はスランプ 6cm の場合より 2.5cm の方が大きく、その影響は粗骨材よりも細骨材の置換の方が強くなった。
- (3) スランプ 2.5cm 程度のコンクリートでは FNS の混合により自立性は向上した。また、フェロニッケルスラグ粗骨材の混合によりスランプに関係なく自立性を保持できた。
- (4) フェロニッケルスラグ粗骨材の混合により、自立性と充填性という相反する性能を保持できることがわかった。
- (5) FNS, FNG に関係なくフェロニッケル骨材を混合したコンクリートは、無混合よりも圧縮強度、曲げ強度、アブレイジョン摩耗への抵抗性は大きくなった。

## 参考文献

- 1) (社)セメント協会編：コンクリート舗装 新時代，第1版第1刷，2011.12
- 2) 佐藤聡明，鎌田 修，坂本康文：舗装用スリップフォームコンクリートの施工性を考慮したフレッシュ性状評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp1253-1258，2011.7
- 3) 越澤 哲，坂田 昇，渡邊健三，信田佳延：固練りコンクリートの適切なコンシステンシーの評価方法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，No.2，pp1423-1428，1999.7
- 4) 伊藤康司，國府勝郎，久保雅弘，鈴木一雄：スリップフォーム用コンクリートの品質評価法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp993-998，2002.7
- 5) スリップフォーム工法協会 HP，URL：<http://www.nsfa.jp/>
- 6) 稲葉 諒ほか：加振ボックス充填試験を用いた舗装コンクリートの振動充填性の定量的評価に関する検討，土木学会コンクリート技術シリーズ，No.102，第Ⅲ編 シンポジウム論文集，pp.17-22，2013.11.
- 7) 土木学会編：フェロニッケルスラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー91，pp57-60，1998.1
- 8) 堀口 敬：コンクリートの摩耗に関する研究の現状，コンクリート工学，Vol.31，No.10，pp17-27，1993.10

## 第6章 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工性能評価

### 6.1 概説

#### 6.1.1 はじめに

第4章でも挙げたようにコンクリート用スラグ骨材の需要は増えている。このため、第4章、第5章で取り上げた非鉄スラグ骨材だけでなく、高炉スラグ細骨材への関心もまた高まってきており、それらを用いたコンクリートに関する研究報告も年々増えている。

高炉スラグ細骨材は、鉄鉱石を溶融する際に発生する高炉スラグをコンクリート用細骨材として粒度調整したものである。また、高炉スラグ微粉末を用いることでコンクリートの耐久性が向上することは広く知られているが、高炉スラグ細骨材においても、反応性の高い非晶質のものでは耐久性を向上できることが示唆されている<sup>1)</sup>。

その一方で、スラグ細骨材は粒子の形状や密度、多量のエントラップトエアを巻き込むことなどから、フレッシュコンクリートの性状は安定しにくいことが示唆されており、これは高炉スラグ細骨材でも同様である。また、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工性能に関する報告についても、第3章で述べたように、ブリーディングに関するものが多く、振動下の間隙通過性といった実施工において重要な性能に関する知見は未だ無いようである。

以上から、高炉スラグ細骨材を混合したコンクリートの施工性能の検討を行った。具体的には、高炉スラグ細骨材の種類や置換率を変化させたコンクリートのブリーディング性状およびタンピング試験、加振ボックス充填試験、加振 L フロー試験により振動下の性状を評価した。

#### 6.1.2 高炉スラグ細骨材について<sup>2)</sup>

高炉スラグ細骨材は、高炉水砕スラグを破砕、整粒したものである。非鉄スラグ細骨材は、酸化鉄を多く含んでいるため、特に銅スラグ細骨材では黒色を示しているが、高炉スラグ細骨材はそれをほとんど含まないため白色を示す。絶乾密度は $2.6\sim 2.7\text{g/cm}^3$ 程度であり、非鉄スラグ細骨材の $3.0\sim 3.5\text{g/m}^3$ に比べると小さく、表面はガラス質である。建築学会では、2013年に高炉スラグ細骨材の施工指針の改訂が行われている。

### 6.2 実験概要

#### 6.2.1 使用材料

使用材料の物性を表6.1に示す。高炉スラグ細骨材はBFS5に粒度区分される福山市産高炉

表 6.1 使用材料

材料	種類	記号	産地	物性など
結合材	普通ポルトランドセメント	C	-	密度: $3.16\text{g/cm}^3$ , 比表面積: $3400\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	硬質砂岩砕砂	S	阿波市	表乾密度: $2.57\text{g/cm}^3$ , 吸水率: $1.77\%$ , 実積率: $60.5\%$ , FM: $2.63$
	高炉スラグ細骨材BFS5	BFS5	福山市	表乾密度: $2.73\text{g/cm}^3$ , 吸水率: $0.30\%$ , 実積率: $60.5\%$ , FM: $2.53$
	高炉スラグ細骨材BFS1.2	BFS1.2	倉敷市	表乾密度: $2.73\text{g/cm}^3$ , 吸水率: $0.40\%$ , 実積率: $60.5\%$ , FM: $2.13$
粗骨材	硬質砂岩砕石 5号	G1	鳴門市	表乾密度: $2.57\text{g/cm}^3$ , 吸水率: $1.62\%$ , 実積率: $60.5\%$ , FM: $7.08$
	硬質砂岩砕石 6号	G2	鳴門市	表乾密度: $2.57\text{g/cm}^3$ , 吸水率: $1.62\%$ , 実積率: $60.5\%$ , FM: $6.37$
混和剤	性能AE減水剤	Ad1	-	ポリカルボン酸エーテル系化合物
	AE助剤	Ad2	-	アルキルエーテル系

表 6.2 使用材料

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位数(kg/m <sup>3</sup> )						混和剤添加量 (C×mass%)			
			W	C	S	BFS5	BFS1.2	G1	G2	Ad1	Ad2	
N	47	47	165	350	802	-	-	181	724	1.2	0.005	
BFS5-50					401	426						
BFS5-30					562	256						
BFS5-100					-	852						
BFS1.2-30					562	-						256
BFS1.2-50					401	-						426

スラグ細骨材（以下、BFS5.0と称する）と、BFS1.2に粒度区分される倉敷市産高炉スラグ細骨材（以下、BFS1.2と称する）の2種類を用いた。

### 6.2.2 コンクリートの配合条件

表 6.2 にコンクリートの配合を示す。いずれの配合も、単位セメント量、単位水量、細骨材率を一定とした。N は骨材として硬質砂岩砕石・砕砂のみを用いたコンクリートである。高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの配合名は「高炉スラグ細骨材の種類－容積置換率」として表した。またコンクリートは、強制二軸練りミキサーにより材料を約3分間練り混ぜて作製した。

### 6.2.3 試験方法

#### (1) スランプ試験および空気量試験

スランプを JIS A 1101, 空気量を JIS A 1128 に従い測定した。また、コンクリートの練上がり温度も測定した。

#### (2) ブリーディング試験

ブリーディング試験は、JIS A 1123 に従い行った。

#### (3) 加振ボックス充填試験

第3章および第4章と同様に実施した。

#### (4) 加振Lフロー試験

加振Lフロー試験は、第4章と同様に実施したが、フローが100mm, 200mm, 300mm, 400mm, 500mmに達する時間も併せて計測した。また、詳細は後述するが、測定結果を踏まえてフローが200mmと300mmに到達した時間から以下の式により、 $V_{L\text{フロー}}$ を算出した。

$$V_{L\text{フロー}}(\text{mm/s}) = \frac{300\text{mm} - 200\text{mm}}{T300(\text{s}) - T200(\text{s})} \quad (4.1)$$

ここに、

T300：加振Lフロー300mmに到達した時間 (s)

T200：加振Lフロー200mmに到達した時間 (s)

#### (5) タンピング試験

タンピング試験は、第3章および第4章と同様に行ったが、タンピング8回ごとのスランプ・スランプフローは測定せず、簡易的に行った。従って、試験終了後のスランプフローを32回で除したものをタンピング1回あたりの変形量、単位変形量 (mm/回) として示した。

表 6.3 フレッシュ性状試験結果

配合名	試験項目					
	ブリーディング試験, 加振ボックス充填試験			タンピング試験, 加振Lフロー試験		
	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
N	13	4.9	21.1	11	4.0	19.2
BFS5-30	-	-	-	11.5	3.0	18.6
BFS5-50	13	5.0	20.3	11	5.5	18.1
BFS5-100	11	5.0	20.2	-	-	-
BFS1.2-30	11	6.0	20.0	11.5	4.0	18.3
BFS1.2-50	13	7.0	18.7	12	4.0	19.1

### 6.3 実験結果および考察

#### 6.3.1 フレッシュ性状試験結果

表 6.3 にフレッシュ性状試験結果を示す。BFS5-100 では、練り上がり直後からブリーディングが発生していることが目視で確認でき、またスランプ形状は写真 6.1 に示すように崩壊していた。



写真 6.1 スランプ形状

#### 6.3.2 ブリーディング性状の評価

図 6.1 にブリーディング量と時間の関係を示す。ブリーディングの増加傾向に着目すると、BFS5-100 では 60 分までのブリーディング量の増加が大きくなった。BFS5-50 では、60 分以降にブリーディング量の増加が大きくなったが、BFS5.0-100 に比べると緩やかな増加傾向であり、150 分以降では横ばいとなり、置換率によって増加傾向に違いが見られた。BFS1.2 を使用した配合では、いずれの置換率の場合にも初期から終局まで緩やかに増加した。終局時間では、BFS5.0-100 を用いた場合、N の半分程度まで短くなった。これは、ブリーディング水の上昇が速いため、短時間でブリーディング水の上限量に達したためと考えられる。

図 6.2 に終局ブリーディング量を示す。BFS5 の置換率の増大と共にブリーディング量は多くなったが、BFS5-50 では鉄筋コンクリート構造物に適用できる範囲 (建築学会基準  $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ) であり、それほど多くはない範囲であった。BFS1.2 を用いた場合では、50%置換した BFS1.2-

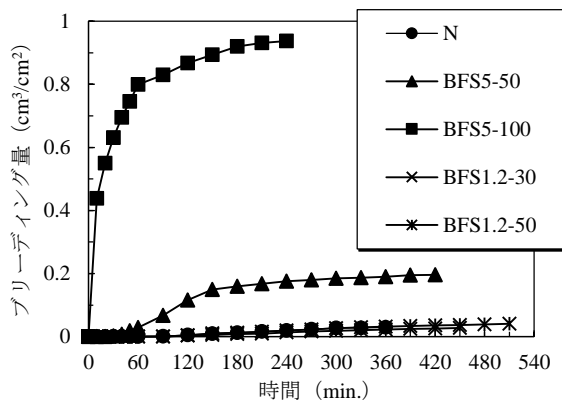


図 6.1 ブリーディング量と時間の関係

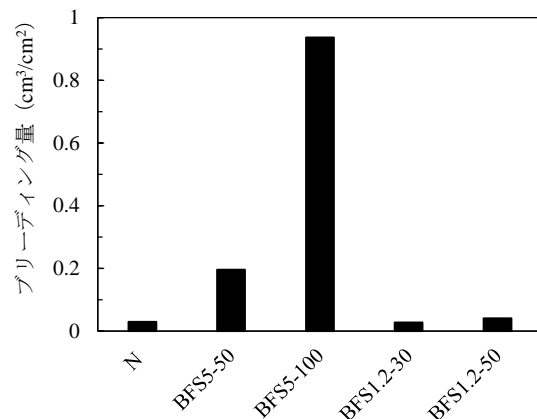


図 6.2 終局ブリーディング量

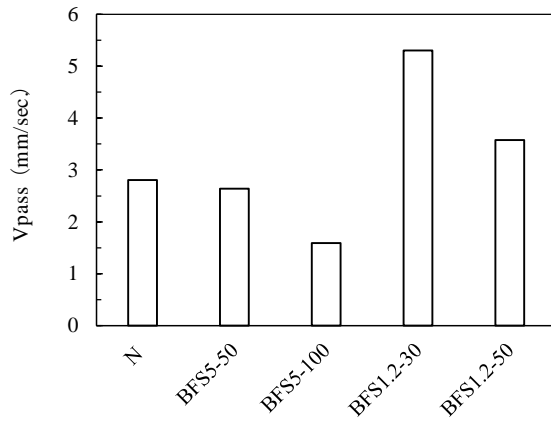


図 6.3 各種配合における Vpass

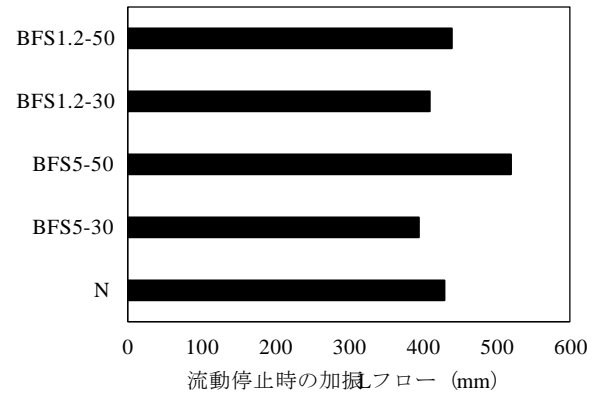


図 6.4 流動停止時の加振 L フロー



写真 6.2 加振 L フロー試験状況

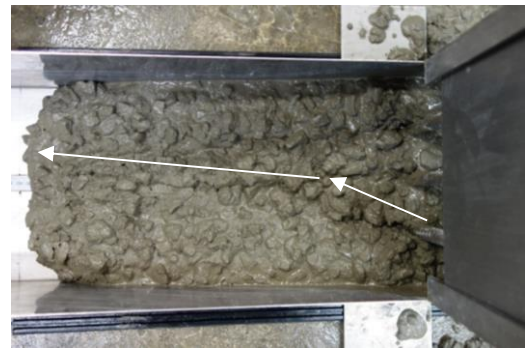


写真 6.3 加振 L フロー試験状況

50 でも、終局ブリーディング量は N と同程度であった。従って、スラグ骨材であっても BFS1.2 のように粒度を細かくすることでブリーディング量を低減できると考えられる。

以上から、高炉スラグ細骨材の種類によらず置換率 50% までであれば、ブリーディング量としては比較的小さいことが分かった。

### 6.3.3 間隙通過性評価

#### (1) 加振ボックス充填試験による評価

図 6.3 に各種配合における Vpass を示す。BFS5 を用いた場合、N よりも BFS5-50 では僅かに遅くなり、BFS5-100 では N の半分程度にまで低下した。BFS5-100 では、加振開始直後から多量の水が上昇する様子が目視で確認でき、材料分離が顕著に生じていた。従って、材料分離を生じ易かったため、間隙通過性が低下して Vpass が遅くなったと考えられる。一方、BFS1.2 を用いた場合では N よりも速くなる傾向にあった。これは第 4 章で示唆したように、BFS1.2 の粒子が細かく、粗骨材間や粗骨材と鉄筋の衝突を緩和させたためと考えられる。また、Vpass は置換率に依存していないため、これも非鉄スラグ細骨材と同様に、粒度分布の影響などから最適な置換率が存在すると考えられる。

#### (2) 加振 L フロー試験による評価

スランプ試験、ブリーディング試験、加振ボックス充填試験の結果から、BFS5 を 100% 置換したコンクリートでは、材料分離が著しいため実施工で用いられる機会は少ないと考えられる。そのため、置換率 50% を上限とした中での置換率による影響を確認するため、これ以降の試験には置換率 30% とした配合を用いた。図 6.4 に流動停止した時の加振 L フローを示す。種類に

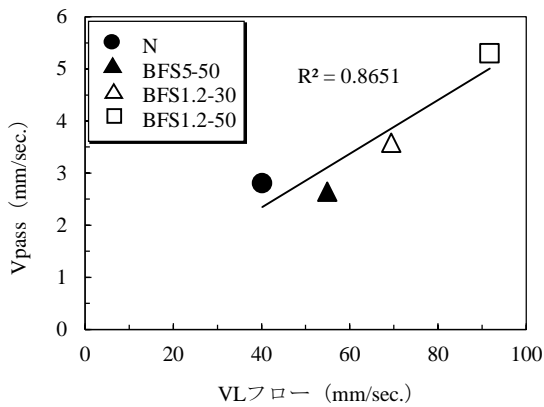


図 6.5 Vpass と VLフローの関係

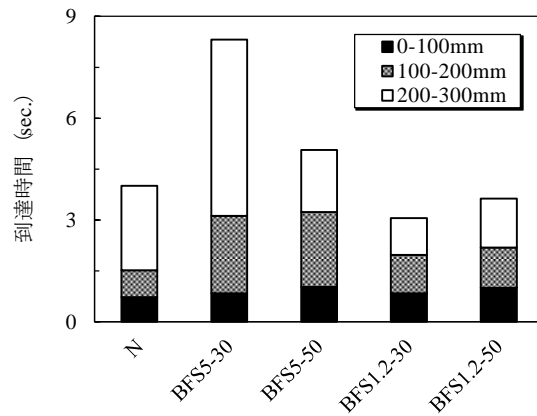


図 6.6 フロー到達時間

よらず高炉スラグ細骨材を用いた配合では 30%置換した場合、N よりも L フローが若干小さくなった。一方で 50%置換した場合には N と同等以上となり、特に BFS5-50 では 500mm を超え、N よりも 100mm 程度、停止するまでの流動距離が長くなった。第 3 章で、非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートに対して加振 L フロー試験を実施した結果、非鉄スラグ細骨材を多く混合することで停止までの流動距離が長くなった。この要因としては、スラグ細骨材の置換率の増加と共にコンクリートの単位容積質量が大きくなることで慣性力も大きくなることが影響したと考察した。しかし、BFS5 と同等の密度を持つ BFS1.2 を 50%置換してもそれほど流動停止距離が長くなっていないため、粒度分布等の影響があると考えられる。

また、写真 6.2 および写真 6.3 は最もフローが小さかった BFS5-30 の試験状況である。写真中に矢印で示したように、鉄筋に沿ってコンクリートが割れていることが分かる。このように、加振 L フロー試験では目視による鉄筋付近の状況を確認することも可能であった。

### (3) 加振ボックス充填試験と加振 L フロー試験の関係

図 6.5 に加振ボックス充填試験の Vpass と加振 L フロー試験の VLフローの関係を示す。なお、VLフローはすべての配合で到達可能であったフロー 300mm までの間で、図 6.6 に示すように全体的に到達時間を最も要する傾向にあった、流動区間 200mm から 300mm 間で算出した。Vpass と比べて VLフローでは全体的に速度が速くなった。これは、第 4 章で示したように加振ボックス充填試験では充填高さ 190mm 以降、上向き方向へコンクリートが流動するため充填条件が厳しくなるのに対して、加振 L フロー試験では継続して水平方向に流動することから、流動条件としては加振ボックス充填試験よりも易しいためである。しかし、間隙通過速度の値に大きな差があるものの両者には相関関係が見られた。

非鉄スラグ細骨材を用いた場合には、密度の大きさから加振ボックス充填では間隙通過性を過少に評価する可能性を考慮して加振 L フロー試験を行った。その結果、加振ボックス充填試験と加振 L フロー試験に相関が表れにくいことを示した。これに対し、本実験では両試験に良好な相関関係が見られた。これは、高炉スラグ細骨材の密度が非鉄スラグ細骨材の密度に比べると小さいことや、VLフローを算出する流動区間を選定し直したことが要因と考えられる。また、BFS を 50%置換までとした本配合の中では、種類によらず高炉スラグ細骨材の置換によって Vpass および VLフローは N とほぼ同等かそれ以上になっており、間隙通過性に問題はないと考えられる。





写真 6.4 スランプフロー形状  
(配合 : N)



写真 6.5 スランプフロー形状  
(配合 : BFS5-50)



写真 6.6 スランプフロー形状  
(配合 : BFS1.2-50)

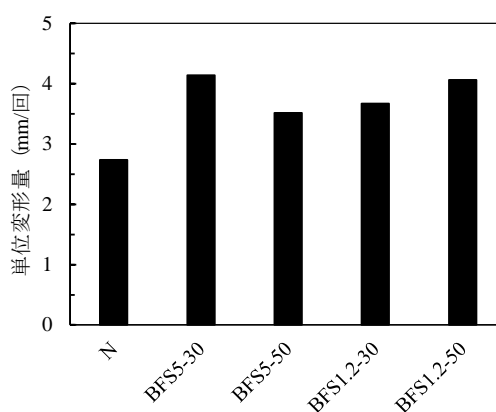


図 6.7 各種配合における単位変形量

加振 L フロー試験は、試験に必要な試料の量が加振ボックス充填試験の半分程度あることなど、加振ボックス充填試験よりも試験の簡易性が高い。また、流動状況を目視で確認でき、間隙通過速度だけでなく変形量も測定できるため、試験性に優れているといえる。

#### 6.3.4 タンピング試験による変形性と材料分離の評価

写真 6.4 から写真 6.6 にタンピング 32 回後のスランプフロー形状の様子として、N, BFS5-50, BFS1.2-50 のものを示す。N ではスランプの上円を保っており、またフロー端部に水跡は確認されず、良好な形状を示した。一方、BFS5-50 および BFS1.2-50 ではスランプの上円は崩れ、フローの端部には水跡が確認できる。また表面は粗く、粗骨材粒子の形状が見て取れる。これらのことから、BFS5-50 および BFS1.2-50 では振動を加えることで材料分離を生じやすいことが分かる。このような傾向は、それぞれの種類の高炉スラグ細骨材を 30% 置換した場合にも見られた。上述したブリーディング試験結果では、BFS5-50 では N よりもブリーディング量は多くなったものの、BFS1.2 では置換率によらず同程度であった。静的条件下で行うブリーディング試験での水の分離現象とは違い、タンピング試験のように振動という動的条件が加わったときに、BFS1.2 を用いた場合においても水の分離が生じやすくなった。

図 6.7 にスランプフローの単位変形量を示す。種類によらず高炉スラグ細骨材を用いた場合、単位変形量は大きくなった。振動付与によって変形する際の良好な広がり方としては、スラン

プ上円を保ちつつスランプ下部のみが自重によって広がることである<sup>3)</sup>。本実験の高炉スラグ細骨材を用いた配合では、振動付与によりフローが良好に広がったというよりも、粗骨材とペーストが分離気味になったため、粗骨材が崩れながら広がったことで、単位変形量が大きくなったと考えられる。

#### 6.4. まとめ

本章では、2種類の高炉スラグ細骨材（BFS5 および BFS1.2）を用いたコンクリートの施工性能について、タンピング試験、加振ボックス充填試験、加振 L フロー試験を行って評価した。また、ブリーディング性状についても確認した。本章で得られた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) ブリーディング量は、BFS5 の置換率の増加と共に無混合の配合よりも増加したが、置換率 50%以下では比較的少なかった。また、BFS1.2 を使用した場合には置換率によらずブリーディング量は無混合のものと同程度であった。
- (2) 加振ボックス充填試験および加振 L フロー試験により間隙通過性を評価した結果、BFS5 を置換率 100%で使用した場合、加振による材料分離が顕著となり間隙通過速度は遅くなった。しかし、種類によらず高炉スラグ細骨材の置換率 50%まででは、無混合のものと同程度以上の間隙通過速度を示した。
- (3) 高炉スラグ細骨材を使用した本配合の中では、加振ボックス充填試験と加振 L フロー試験の間隙通過速度に良好な相関関係がみられた。また、加振 L フロー試験では間隙通過状況を目視で確認でき、振動下の変形量が小さい配合においては鉄筋に沿って割れが生じることを確認した。
- (4) タンピング試験により振動下での変形後のスランプフローの形状を確認した結果、種類によらず高炉スラグ細骨材の混合により、水が分離する傾向がみられた。BFS1.2 を用いた場合、静的条件下で行うブリーディング試験では水の分離は無混合のものと同様に小さかったことから、タンピング試験のように振動を付与させた中でその分離特性が顕著になると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 綾野克紀, 藤井隆史: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究, 土木学会論文集E2, Vol.70, No.4, pp.417-427, 2014
- 2) 銑鉄スラグ協会ホームページ, URL : <http://www.slg.jp/slag/product/kotuzai.html>
- 3) 土木学会編: コンクリート技術シリーズ94, コンクリートの施工コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会報告書, 2011.5

## 第7章 表面気泡の挙動の可視化と表面気泡除去および表面の締固めが硬化コンクリートの表層品質に与える影響

### 7.1 概説

#### 7.1.1 はじめに

コンクリート構造物の美観を損なう不具合として表面気泡がある。また、表面気泡は美観の低下だけでなく、耐久性を低下させる一因となることも示唆される<sup>1), 2)</sup>。

写真7.1に示す表面気泡抜き取り装置（以下、装置と称する）は、打設直後のコンクリートと型枠の境界面に挿入し、そして引き抜くだけの簡易な作業で表面気泡を除去することができ、美観に有効である。また、装置使用により、コンクリート表面に締固め効果が付与され、これらの効果により劣化因子の侵入を抑制し、表層品質の向上が期待できる<sup>3)</sup>。

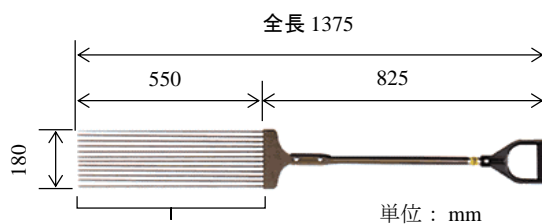
一方で、一部のコンクリート配合では装置の効果が発揮されない可能性も示唆されている。装置の使用回数を増やすことで表面気泡除去効果を向上させられるが、劣化因子侵入の抑制が希薄になることが懸念される<sup>4)</sup>。このため、少ない使用回数で効率的に表面気泡除去を行うことが求められ、コンクリート配合に応じた使用方法の提案が望まれる。そのためには装置による表面気泡除去の過程が大きな要因になると思われるが、その詳細には不明瞭な部分がある。

以上を踏まえ本実験では、表面気泡除去の過程を明らかとすることを目的に、可視化モデルコンクリート（以降、モデルコンクリートと称す）を使用した気泡除去の可視化実験を行った。また、実際のコンクリートで試験体を作製し、可視化実験との整合を確認すると共に、透気係数の測定を行って装置による締固め効果を確認した。

#### 7.1.2 表面気泡抜き取り装置について<sup>5)</sup>

形状としては、写真7.1のように、先端が楕状となっており、この楕状の部分で打設直後のコンクリートと型枠の界面に挿入する。また、施工箇所に応じて柄の長さを変えたものや挿入部分がアーチ状になったものもある。標準的な使用方法是以下の通りである。

コンクリート打設時、型枠とコンクリートの境界面に対し、型枠に沿って装置を上下に動かしながら挿入した後、同じ要領で上下に動かしながら引き上げる。打設完了後、適切な時間を空けて、再度装置を型枠に沿って上下に動かしながら挿入し、底面に達したら上下に動かしながらゆっくりと引き上げる。上記の要領で1層目の気泡を抜いてから2層目を打設する。層打設の場合も1層打設と同じ要領で作業するが、2層目以降に装置を適用するとき、打設した層との境界から5 cm程度、装置の先端が挿入されるようにする。



挿入部分：ピアノ線 直径：3.5 mm×12本

写真7.1 表面気泡抜き取り装置

表 7.1 モデルコンクリートの使用材料

種類	材料	密度	流動性および粘性
モデルモルタル	高吸水性高分子樹脂溶液	1.0 g/cm <sup>3</sup>	モルタルフロー*: 150mm 塑性粘度: 10Pa·s
モデル粗骨材	造粒焼成体	0.85 g/cm <sup>3</sup>	-

\*フローはフロー台での打撃を与えていないときのフロー



写真 7.2 モデルコンクリート



写真 7.3 アクリル製ボックス形容器

## 7.2 実験概要

### 7.2.1 使用した装置

使用した装置は写真7.1に示す標準型のものであり、挿入部分にピアノ線（直径：3.5mm）が12本配置されたものである。

### 7.2.2 可視化実験に関する概要

#### (1) 使用材料・モデルコンクリートの配合

モデルコンクリートの使用材料を表5.1に示す。モルタルを想定した、モデルモルタルは無色透明の粘性流体であり、装置や気泡の挙動を視覚的に確認できる<sup>6)</sup>。また、モデルモルタルは高吸水性高分子樹脂を4.0g/l、水に溶かして作製した。配合はモデルモルタルに対するモデル粗骨材の容積比 (Vg/Vm) を50%として作製した。作製したモデルコンクリートを写真7.2に示す。

モデルコンクリートは粗骨材とモルタルの密度差など、実際のコンクリートと異なる点もあるが、型枠付近でのモルタル中の気泡の挙動を理解するには有効と判断した。なお、モデル粗骨材はエントラップトエアを発生させて気泡を生じ易くすることが主な目的として混入した。

#### (2) 表面気泡除去過程の確認

写真7.3に示すアクリル製のボックス形容器にモデルコンクリートを詰めた後、表面気泡を確認して装置の挿入・引き抜き（装置の挿入・引き抜き速度=20mm/s程度）を行い、その過程を目視により確認した。使用したボックス形容器は、高流動コンクリートの充填性評価 (JSCE-F511) に使用されるものと同形であるが寸法は若干小さい(高さ 600mm 幅 300mm 奥行 220mm)。本実験では、充填性評価には使用せず、可視化のための容器として用いた。



表 7.2 コンクリートの使用材料

種類	材料名：記号	物性
セメント	普通ポルトランドセメント：C	密度：3.16 (g/cm <sup>3</sup> )，比表面積：3340cm <sup>2</sup> /g
細骨材	鳴門市産硬質砂岩砕砂：S	表乾密度：2.57 (g/cm <sup>3</sup> )，FM：2.31，吸水率：1.77%，実積率：68.6%
粗骨材	阿波市産硬質砂岩砕石5号：G1	表乾密度：2.57 (g/cm <sup>3</sup> )，FM：2.31，吸水率：1.62%，実積率：57.6%
	阿波市産硬質砂岩砕石6号：G2	表乾密度：2.57 (g/cm <sup>3</sup> )，FM：6.37，吸水率：1.60%，実積率：55.4%
混和剤: Ad	高性能AE減水剤 (Ad1)	ポリカルボン酸エーテル系化合物
	AE剤 (Ad2)	アルキルエーテル系

表 7.3 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				Ad1	Ad2	実測スランブ(cm)	実測空気量 (%)
			W	C	S	G				
No.1	50	45	175	350	771	946	C×1%	C×0.001%	18	4.7
No.2	45	45	158	350	791	970	C×1%	C×0.001%	6	3.0

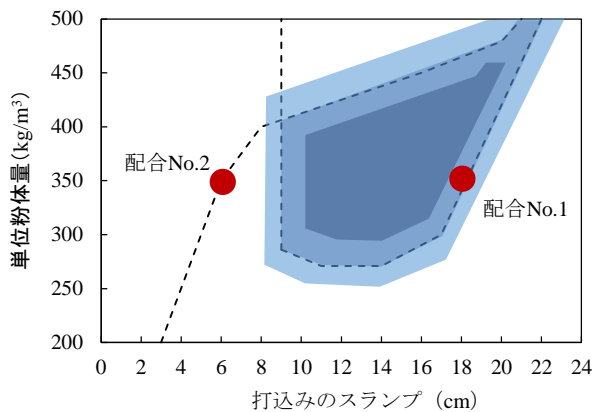


図 7.1 配合条件

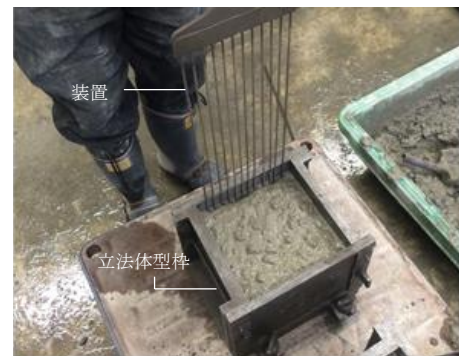


写真 7.4 装置使用の様子

### 7.2.3 コンクリート実験に関する概要

#### (1) 使用材料およびコンクリートの配合

表7.2に使用材料，表7.3にコンクリートの配合を示す．配合は，施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針に示される打込みのスランブと単位セメント量の関係図<sup>7)</sup>より(図7.1)，施工性能が良好と思われる配合(No.1)と劣るとと思われる配合(No.2)とした．目標スランブは18.0±2.0cmおよび8.0±2.0cmとした．また，目標空気量はどちらも4.5±1.5%とした．

#### (2) フレッシュ性状試験

スランブ試験をJIS A 1101，空気量試験をJIS A 1128に準じて実施した．

#### (3) 試験体概要

試験体は高さ200mm幅200mm奥行200mmの立方体とした．また，試験体を作製する際に，装置を側面4面に使用した場合と，未使用で作製した．

作製手順は、立方体型枠にコンクリートを1層で詰め、内部振動機（直径：28mm，振動数：200～280Hz）による振動締固めを5秒間行った。締固め時間はコンクリート標準示方書 施工編に記される振動締固め時間の目安<sup>8)</sup> 5秒～15秒の下限値としており、締固め条件は比較的厳しいと推定される。装置使用の場合は、締固め後に装置を使用した（写真5.4）。なお、装置の挿入・引き抜き速度は前節7.2.2と同様となるように行ったが、ピアノ線と粗骨材の噛み合いにより完全に一定の速度とはならなかった。また、装置の使用回数が増えることによる締固め条件の変化を避けるため、使用回数は1回のみとした。打設後は、木づちにより型枠を叩いた。

#### (4) 表面気泡面積率の算出方法

試験体の脱型後、デジタルカメラにより試験体表面を正面から 18cm×13cm の枠に収まるよう撮影した。撮影した写真を二値化して枠内の全面積に占める気泡（直径 1mm 以上）の割合を算出し、試験体の側面 4 面の平均値を表面気泡面積率（%）とした。

#### (5) 透気係数の測定

測定の様子を写真 7.5 に示す。試験体は 6 ヶ月間、恒温恒湿状態の室内に静置した後に用いた。試験体の含水率を高周波容量方式の水分計測を用いて測定した。その結果、含水率はいずれの試験体も 5% 程度であった。透気係数の測定箇所は試験体側面の 4 面とし、測定位置は試験体中央とした。測定は既往の研究を参考に<sup>9)</sup>、ダブルチャンバーを用いたトレント法により行った。透気係数は減圧開始 60 秒以降の内部チャンバー直下からの栓流によるチャンバー内の圧力変化量と経過時間から、式(1)によって求めた<sup>9)</sup>。

$$4 \left( \frac{V_c \left( \frac{dp_i}{dt} \right)}{A(p_a^2 - p_i^2)} \right) \frac{\eta p_a}{\varepsilon} \int_{t_0}^t \left[ 1 - \left( \frac{p_i}{p_a} \right)^2 \right] dt \quad (1)$$

ここに、 $V_c$ ：内部チャンバーと接続要素（ホース等）の容積( $m^3$ )、 $\varepsilon$ ：本法で仮定したコンクリートの空隙量<sup>8)</sup>=0.15( $m^3/m^3$ )、 $P_i$  は内部チャンバーの圧力( $N/m^2$ )、 $A$  は仮定した栓流の断面積( $m^2$ )である。



写真 7.5 透気試験の状況

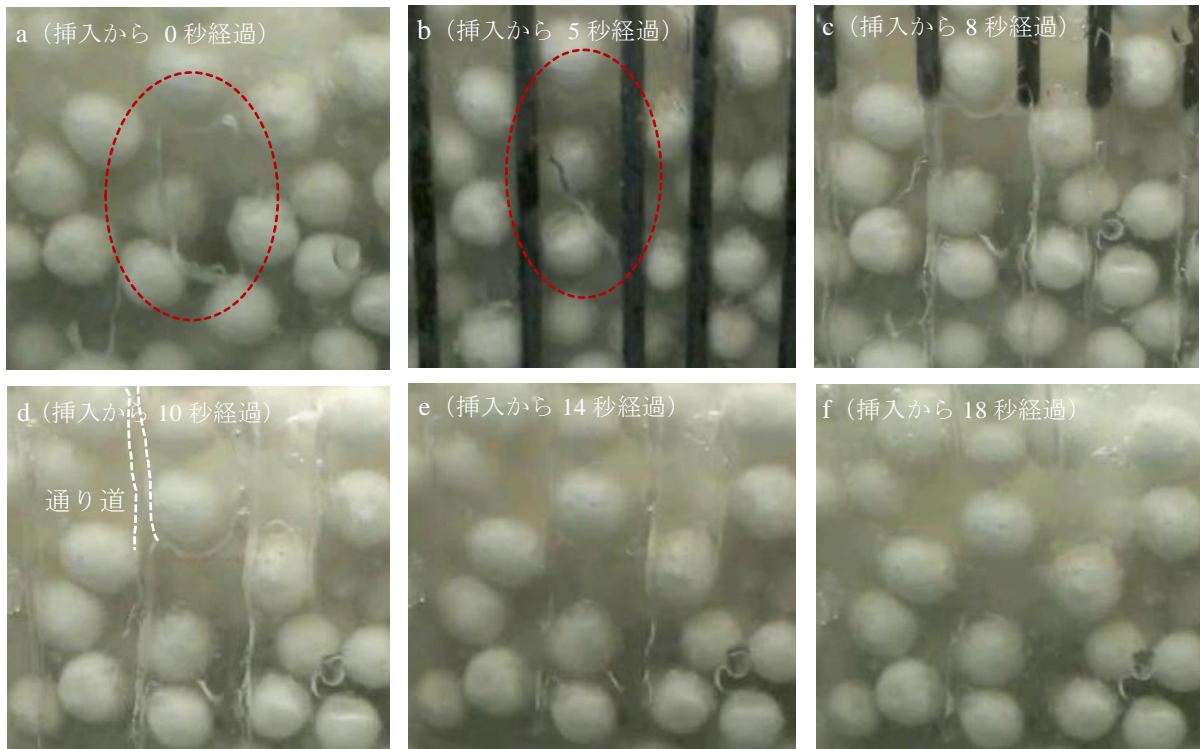


写真 7.6 表面気泡除去の様子

### 7.3 実験結果および考察

#### 7.3.1 モデルコンクリートによる表面気泡の挙動の可視化

写真 7.6 は、装置による表面気泡除去の様子である。装置を挿入する前の様子（写真 5.5, a）では、破線内に示す部分に大きな気泡（縦 25mm，幅 12mm 程度）が確認された。装置の挿入後、この気泡は装置のピアノ線部分に連行されるような挙動を示し、ピアノ線が通過するとともに挿入方向に変形した（写真 7.6, b 破線内）。装置引き抜き時の様子を示した写真（写真 7.6, c~e）では、ピアノ線が通った後の道すじ（以降、通り道と称す）が確認された。気泡は装置を引き抜いた後、通り道が徐々に塞がるにつれて小さくなっていった。そして装置を引き抜き終わった後、少し経過してから気泡は消失した（写真 5.5, f）。

以上より、装置による表面気泡除去の過程を整理する。まず、装置の挿入により気泡は装置のピアノ線部分に集中する。その後、装置を引き抜く際に生じるピアノ線の通り道に気泡中の空気が流出する。そして、ピアノ線の通り道が下方方向から塞がっていくとともに通り道に流出した空気が上昇する。これにより装置引き抜き方向の表面まで気泡中の空気が追い出される。

写真 7.7 は、装置が通過した後の様子である。破線内に示すように、装置が通過してもモデルモルタルが充填されずに通り道が残存した箇所も確認された。また、気泡に含まれるすべての空気が通り道へ流入する前に、通り道がモデルモルタルにより充填され、気泡

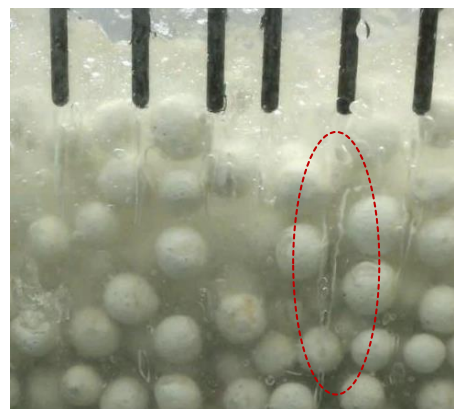


写真 7.7 装置通過後の様子









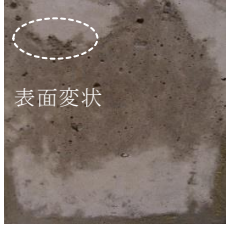
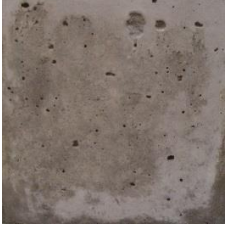

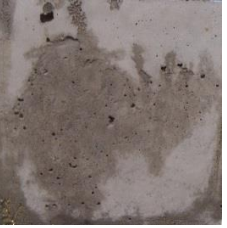
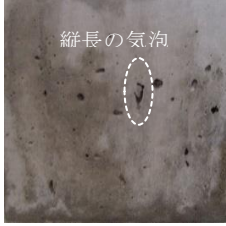



配合	装置	側面1	側面2	側面3	側面4
No. 1	未使用				
	使用				
No. 2	未使用	 表面変状			
	使用	 縦長の気泡			

写真 7.8 コンクリート試験体表面の様子

が完全には除去されない場合も確認された。ピアノ線の通り道が残存した場合、比較的大きな気泡となってコンクリート表面に顕在化することが懸念される。ピアノ線の通り道が残存しないようにするためには、引き抜き作業をゆっくりと行うことが有効であると思われる。実際、引き抜く速度を遅くした場合（10mm/s 程度）では、ピアノ線の通り道が残存し難くなった。

### 7.3.2 硬化コンクリートの品質評価

写真 7.8 にコンクリート試験体表面（側面 4 面）の様子を示す。No.1 を見ると、装置未使用の場合ではどの面においても表面気泡が確認できるのに対し、装置を使用した場合ではすべての面で表面気泡がほとんど確認されなかった。これは、図 7.2 に示す表面気泡面積率にも表れており、装置使用では 0.03% 程度と低い値を示した。これらより、装置の気泡除去効果が発揮されたと分かる。

No.2 では、装置未使用の場合に気泡のように深くはないが、広い範囲（45mm 程度）で表面が窪んだような変状（以降、表面変状と称す）が確認された（写真 7.9）。これは充填不足により表面までペーストやモルタルが十分に行き届かなかったため生じたと思われるが、装置使用の場合では表面変状が見られなかった。本実験では、試験体の作製時に振動締め時間を短く



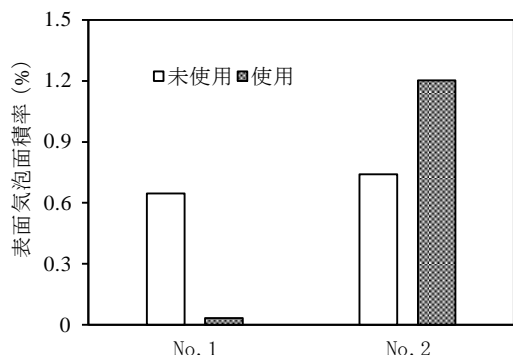


図 7.2 表面気泡面積率

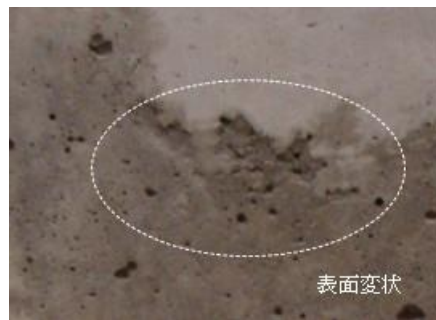


写真 7.9 表面変状の拡大

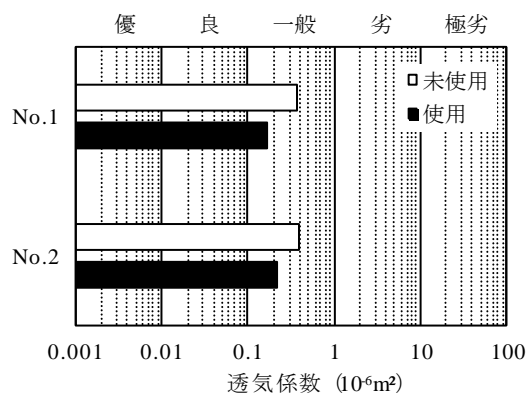


図 7.3 透気係数

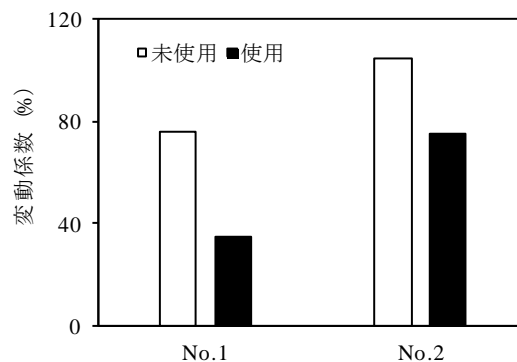


図 7.4 透気係数の変動係数

した。従って、型枠への充填性は打込み直後のコンクリートの拡がりに依存する。そのため、コンクリートのコンシステンシーの影響が大きく、スランプが小さい No.2 では充填されにくかったと考えられる。このように、締固めが十分でない配合では表面に変状が表れたが、装置による表面の締固め効果により改善した。

一方で、No.2 では装置使用の場合に大きな表面気泡が多いように見える。図 7.3 に示す表面気泡面積率でも、装置を使用した場合には装置未使用の 2 倍近い値を示した。可視化実験で確認したように、装置の挿入により気泡はピアノ線に連行される。これによりコンクリート内部の気泡を表面側へ引き寄せたため気泡が表面化した。空気の上昇が少なかったため表面気泡としては多くなったと思われる。また、気泡の形に着目すると、縦に長い気泡が見られた（写真 7.8 No.2, 側面 1）。

この縦長の気泡は、前述の可視化実験結果と同様にピアノ線の通り道が充填されず、残存してできた気泡と推定される。No.1 ではこのような気泡痕は見られないことから、No.2 のように充填性などの施工性能が良好ではないコンクリートでは通り道が残存する可能性が高くなると考えられる。ピアノ線の通り道を残存させないためには、引き抜き時間を長くとするなどの対策が有効である。

透気係数を図 7.3 に示す。透気係数は側面 4 面の二乗平均を示した。透気係数による品質評価は、Torrent の研究<sup>10)</sup>を参考に「優」、「良」、「一般」、「劣」、「極劣」の 5 段階で行った。「優」は透気係数 0.001~0.01 ( $\times 10^{-6} \text{mm}^2$ )、「良」は 0.01~0.1 ( $\times 10^{-6} \text{mm}^2$ )、「一般」は 0.1~1 ( $\times 10^{-6} \text{mm}^2$ )、「劣」は 1~10 ( $\times 10^{-6} \text{mm}^2$ )、「極劣」は 10~100 ( $\times 10^{-6} \text{mm}^2$ ) である。これによると、

今回の測定結果はすべて「一般」であり、配合や装置使用による品質の変化は大きくなかった。しかし、両配合で装置未使用に比べ装置使用では透気係数が減少した。

図 7.4 に試験体側面の 4 面における透気係数の変動係数を示す。No.1 と No.2 を比較すると、No.2 の方が全体的に変動係数は大きくなった。上述の通り、No.2 では所々に表面変状が見られた。このような影響から、No.2 では試験体の側面ごとで表層品質のばらつきが大きくなり、その結果が透気係数のばらつきとして表れたと考えられる。一方で、装置使用により変動係数が減少する傾向が両配合で見られた。

#### 7.4 まとめ

本章では、表面気泡抜き取り装置（装置）の使用による表面気泡除去の過程を可視化実験により確認し、コンクリート試験体と比較した。また、コンクリート試験体の透気係数を測定し、装置による表面の締固め効果を確認した。本実験の範囲で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 装置による表面気泡除去のメカニズムとしては、装置を引き抜く際に生じるピアノ線の通り道に気泡中の空気が流出して表面に上昇し除去される。
- (2) 装置を引き抜く際に生じるピアノ線の通り道が残存する場合が確認された。ピアノ線の通り道が残存すると、コンクリート表面に大きな気泡となって残ることが懸念される。
- (3) 配合によっては装置のピアノ線に気泡が引き寄せられることにより、表面付近に内在する気泡が表面化し、表面気泡面積率が装置未使用の 2 倍程度に増大した。
- (4) 施工性能が不十分であると思われる配合に対し、装置使用による表面変状の改善がみられた。
- (5) 装置使用により透気係数は減少し、また測定箇所ごとの透気係数の変動係数を抑制できた。装置使用により表層品質の向上や品質のばらつきの抑制に寄与する。

## 参考文献

- 1) (社) 土木学会：コンクリート技術シリーズ，構造物表面のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会（335委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集，No80，2008
- 2) (社) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'14 [基礎編] ， pp.14-16，2014.10
- 3) 渡邊 健，橋本親典：表面気泡抜き取り装置を用いたコンクリートの締固め効果と劣化因子侵入抑制効果に関する実験的検討，第 38 回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，pp.103-106，2011
- 4) 進藤拓未ほか：表面気泡抜き取り装置の使用条件と中性化抑制効果の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，2011.7
- 5) 株式会社らく〜だ ホームページ，URL：[http://www.our-yamazen.co.jp/pikacon/pika\\_siyou.html](http://www.our-yamazen.co.jp/pikacon/pika_siyou.html)
- 6) 吉田元昭：局部交錯領域のせん断流に着目した 2 軸強制練りミキサの高性能化，徳島大学大学院学位論文，pp.72-80，2009.9
- 7) 土木学会編：コンクリートライブラリー126，施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針（案），2007.3
- 8) 土木学会編：コンクリート標準示方書 施工編[2012 年度版]，pp.117-118，2012.12
- 9) 下澤 和幸，今本 啓一，山崎 順二，永山 勝：鉄筋コンクリート構造物の耐久性能検証のための透気性試験による指標値と中性化深さの関連について，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.2005-2010，2009.7
- 10) Torrent, R.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover onsite, Mater.&Struct.,Vol.25, No.150, pp.358-365, July.1992

## 第 8 章 結論

### 8.1 結論

本研究では、コンクリート構造物における鋼材量が増加し、またコンクリートの構成材料が多様化している現状を鑑み、フレッシュコンクリートの施工性能を十分に確保することで信頼性の高いコンクリート構造物に繋げることを目指して、各種配合条件のフレッシュコンクリートに対する評価と各種評価試験方法の適用性について検討した。第 3 章から第 7 章の各章で得られた成果を以下にまとめる。

### 第 3 章 フレッシュコンクリートの施工性能評価に必要な試験条件の検討

第 3 章では、フレッシュコンクリートの施工性能評価試験方法に必要な試験条件の抽出およびそれらの試験の適用性を検討することを目的に、タンピング試験および加振ボックス充填試験を各種配合条件のコンクリートに対し行った。第 3 章の結果をまとめると以下のようになる。

- (1) タンピング試験を実施して振動下の変形性を評価した結果、同一スランプのコンクリートであっても、単位セメント量の違いによってスランプフロー変形係数  $K_{sf}$  は異なることが確認できた。
- (2) 加振ボックス充填試験により配合条件の相違による充填性の変化を評価するにあたっては、振動数を通常 (280Hz) とし、流動障害 R II を用いた試験条件が有効であった。この試験条件によって単位セメント量だけでなく、細骨材率や骨材種類による充填性への影響を捉えることができた。
- (3) 柱部材を想定した模擬施工試験における充填高さは、加振ボックス充填試験結果の間隙通過速度  $V_{pass}$  との相関が高かった。模擬施工試験とタンピング試験との相関は、配合条件によっては認められるが、単位セメント量が小さい場合や細骨材率が小さい配合に対する相関は低かった。
- (4) 高強度コンクリート用の高粉体な配合に対し、タンピング試験ではセメント種類や配合間の相違による傾向や FA 混和の有無による変化を明確にすることは困難であった。一方、加振ボックス充填試験では、セメント種類やフライアッシュの混和の有無による充填性への影響を評価できた。また両試験の相関については、FA を混和した配合には概ね  $K_{sf}$  の増加と共に  $V_{pass}$  は低下する傾向が見られた。

#### 第4章 非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工性能評価

第4章では、吸水率や実積率などの品質が良好ではない普通骨材と品質が良好な普通骨材のそれぞれに対し、非鉄スラグ細骨材を混合したコンクリートにおいて、普通骨材の種類の影響および非鉄スラグ細骨材の混合率による影響を、タンピング試験および加振ボックス充填試験によって評価した。第4章のまとめを以下に示す。

- (1) タンピング試験により振動条件下における変形性を評価した。実積率が大きい良質な骨材と非鉄スラグ細骨材を混合した場合、硬質砂岩碎石・砕砂と混合した場合よりも変形性は大きくなった。非鉄スラグ細骨材の混合により変形性は低下し、特に、砂岩碎石および砂岩砕砂と混合したときに低下が大きかった。
- (2) 加振ボックス充填試験により間隙通過性を評価した。良質な普通骨材のみを使用した場合と比べて硬質砂岩碎石・砕砂のみを使用した場合の間隙通過速度は1/4程度となった。非鉄スラグ細骨材の混合による影響は、フェロニッケルスラグ細骨材を混合した場合、普通骨材およびフェロニッケルスラグ細骨材の種類によらず間隙通過性が向上した。銅スラグ細骨材を混合した場合、良質な普通骨材との混合では間隙通過性は低下した。一方、硬質砂岩碎石・砕砂との混合では、間隙通過性の低下が表れにくかった。
- (3) 非鉄スラグ細骨材を混合した配合では、無混合よりも鉄筋通過後のコンクリートの強度低下が小さくなった。特に、良質な普通骨材との混合では、鉄筋通過後の方が通過前よりも強度は大きい傾向にあった。
- (4) 加振Lフロー試験により硬質砂岩碎石・砕砂と混合した場合の水平方向への間隙通過性を変形量および間隙通過速度の双方から検討した。その結果、非鉄スラグ細骨材の混合率の増大とともに間隙通過性が向上した。これは、非鉄スラグ細骨材の混合率の増大に伴ってコンクリートの単位容積質量が増大し、コンクリートへ働く慣性力が大きくなったためと考えられる。
- (5) 加振ボックス充填試験では充填高さ190mm以降、上向きに充填するため密度の大きい非鉄スラグ細骨材を使用した場合に過少に評価する可能性がある。一方、加振Lフロー試験より得られた結果は、コンクリートの単位容積質量と関連付けることでその妥当性を説明できる。従って、密度が大きい骨材を使用したコンクリートの施工性能を評価する場合、加振ボックス試験よりも加振Lフロー試験の方が適することが示唆される。
- (6) 非鉄スラグ細骨材の混合率の増加と共にブリーディング量は多くなるが、砂岩碎石との混合ではブリーディング量を抑制できた。また、非鉄スラグ細骨材の混合により乾燥収縮量は低減した。非鉄スラグ細骨材コンクリートの乾燥収縮量は骨材の平均吸水率、コンクリートの静弾性係数と相関があったが、特に静弾性係と相関が強かった。

## 第5章 舗装用コンクリートの施工性能評価に関する検討

第5章では、フェロニッケルスラグ骨材を混合した舗装用スリップフォームコンクリート(スランプ2.5cmおよび6cm)の施工性能の評価を行った。第5章で得られた結果をまとめると以下のようなになる..

- (1) 舗装用コンクリートを想定した固練りコンクリートにおいて、使用骨材の違いやその混合率の違いによる自立性および充填性の変化を、タンピング試験および流動障害を使用しない加振ボックス充填試験により評価することができた。
- (2) 細骨材,粗骨材によらず,フェロニッケルスラグ骨材を混合することで充填性は低下した。フェロニッケルスラグ骨材が充填性に与える影響はスランプ6cmの場合より2.5cmの方が大きく,その影響は粗骨材よりも細骨材の置換の方が強くなった。
- (3) スランプ2.5cm程度のコンクリートではFNSの混合により自立性は向上した。また,フェロニッケルスラグ粗骨材の混合によりスランプに関係なく自立性を保持できた。
- (4) フェロニッケルスラグ粗骨材の混合により,自立性と充填性という相反する性能を保持できることがわかった。
- (5) FNS, FNGに関係なくフェロニッケル骨材を混合したコンクリートは,無混合よりも圧縮強度,曲げ強度,アブレイション摩耗への抵抗性は大きくなった。

## 第6章 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工性能評価

第6章では,2種類の高炉スラグ細骨材(BFS5およびBFS1.2)を用いたコンクリートの施工性能について,タンピング試験,加振ボックス充填試験,加振Lフロー試験を行って評価した。また,ブリーディング性状についても確認した。第6章で得られた結果をまとめると以下のようなになる。

- (1) ブリーディング量は,BFS5の置換率の増加と共に無混合の配合よりも増加したが,置換率50%以下では比較的少なかった。また,BFS1.2を使用した場合では置換率によらずブリーディング量は無混合のものと同程度であった。
- (2) 加振ボックス充填試験および加振Lフロー試験により間隙通過性を評価した結果,BFS5を置換率100%で使用した場合,加振による材料分離が顕著となり間隙通過速度は遅くなった。しかし,種類によらず高炉スラグ細骨材の置換率50%まででは,無混合のものと同程度以上の間隙通過速度を示した。
- (3) 高炉スラグ細骨材を使用した本配合の中では,加振ボックス充填試験と加振Lフロー試験の間隙通過速度に良好な相関関係がみられた。
- (4) タンピング試験により振動下での変形後のスランプフローの形状を確認した結果,種類によらず高炉スラグ細骨材の混合により,水が分離する傾向がみられた。BFS1.2を用いた場合,

静的条件下で行うブリーディング試験では水の分離は無混合のものと同等に小さかったことから、タンピング試験のように振動を付与させた中でその分離特性が顕著になると考えられる。

## 第7章 表面気泡の挙動の可視化と表面気泡除去および表面の締固めが硬化コンクリートの表層品質に与える影響

第7章では、表面気泡抜き取り装置（装置）の使用による表面気泡除去の過程を可視化実験により確認し、コンクリート試験体と比較した。また、コンクリート試験体の透気係数を測定し、装置による表面の締固め効果を確認した。本実験の範囲で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 装置による表面気泡除去のメカニズムとしては、装置を引き抜く際に生じるピアノ線の通り道に気泡中の空気が流出して表面に上昇し除去される。
- (2) 装置を引き抜く際に生じるピアノ線の通り道が残存する場合が確認された。ピアノ線の通り道が残存すると、コンクリート表面に大きな気泡となって残ることが懸念される。
- (3) 配合によっては装置のピアノ線に気泡が引き寄せられることにより、表面付近に内在する気泡が表面化し、表面気泡面積率が装置未使用の2倍程度に増大した。
- (4) 施工性能が不十分であると思われる配合に対し、装置使用による表面変状の改善がみられた。
- (5) 装置使用により透気係数は減少し、また測定箇所ごとの透気係数の変動係数を抑制できた。装置使用により表層品質の向上や品質のばらつきの抑制に寄与する。


以上、第3章から第6章で得られた結果から、各種配合条件およびスラグ骨材を使用したコンクリートの施工性能をタンピング試験、加振ボックス充填試験、加振Lフロー試験により評価できることが分かった。また、第6章では加振Lフロー試験と加振ボックス充填試験に相関があることを確認できた。加振Lフロー試験は、加振ボックス充填試験よりも試験に必要な試料の量も少なく済み、簡易性が高く、また変形量、間隙通過速度、目視という種々のパラメータで評価できるため、適用範囲が多いことが期待できる。

第7章では、表面気泡抜き取り装置による気泡除去のメカニズムを明らかにするとともに、表面の締固めが表層品質に与える効果を定量的に示すことができた。

## 8.2 今後の課題と展望

コンクリート構造物は、運搬、打込み、締固めの過程を経て施工され、また各過程でフレッシュコンクリートの品質変動が生じる。従って、事前にコンクリートの配合設計を的確に行うことと、建設現場においてフレキシブルホースから排出される打込み直前の生コンクリートに対して検査することが、充填不良のリスクを低減させるうえで重要である。これは、現場で検査することができれば施工性能が劣ると判断された場合に、打込み方法を変えるなどの対策を立てることができるためである。建設現場でフレッシュコンクリートの施工性能を検査する試験方法としては、簡便かつ少ない人員で行えることが特に求められる。この点においては、タンピング試験は大いに期待できるが、この試験によって得られる試験値は、配合条件によっては必ずしもフレッシュコンクリートの充填性と相関しない。今後は、簡易性の高い新たな検査試験方法の開発を視野に入れつつ、タンピング試験によって充填性を評価できる配合条件の範囲をより明確にする必要があるだろう。しかしながら、第5章で舗装コンクリートの自立性評価をタンピング試験で行ったことや、第6章で高炉スラグ細骨材コンクリートの振動下における分離状況を目視確認できるなど、充填性以外の施工性能を評価する上でも有効な手段となるため、広い範囲で適用されることを期待する。

加振ボックス充填試験も、建設現場で行えなくはないが、この試験を行うには2、3人ほどの人員が必要であることなどから、現実的には厳しいと思われる。しかし、振動条件だけでなく流動を拘束する条件も付与するため、充填性を評価するうえでの信頼性はタンピング試験よりも高く、また各種使用材料・配合条件のコンクリートに対する適用性も高い。従って、レディミクストコンクリートのプラントにおいて、コンクリートの品質を評価するための試験方法として実施されることを望む。加振Lフロー試験については、写真8.1に示すように1人で試験を行うことができるうえ、試験に必要な試料の量が加振ボックス充填試験の半分以下であることなど、簡易性も高い。また、変形量、速度、目視によって評価できる。従って、プラントと現場の双方で共通して適用できる可能性がある。しかし、データの蓄積が不十分であり、今後は各種配合条件のコンクリートへの評価や実施工との整合に関する検討が必要である。

また、加振ボックス充填試験および加振Lフロー試験をプラントでの品質評価試験として適用することで、充填性が劣ると判断されたものは配合設計の見直しを図るといったサイクルの構築を目指したい。このサイクルの普及には、マークのようなプラントの信頼性を表す付加価値を、このシステムを導入したプラントに与えるといった制度を設ける必要があるだろう。

さらに、コンクリート構造物の美観に影響する不具合のうち、表面気泡に関する検討も行った。今回の成果を今後の技術開発に役立てると共に、表面性状の改善が耐久性に与える影響についても追究していきたい。最近では、表面気泡の度合いやコンクリート表面のツヤを品質検査項目として取り入れた活動もあるように、コンクリートの表面品質への注目度は高まっている。これは、美観に優れる方が良好な施工が行われていると考えられるためである。また、美観性に優れるコンクリートの方が使用者へ視覚的にも信頼感を与えることは明白である。



写真 8.1 加振Lフロー試験の様子



## 謝辞

本論文は、徳島大学大学院 橋本親典教授のご指導のもと、筆者が徳島大学大学院先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 建設創造システム工学コース 博士後期課程に在学期間中、実施した研究の成果を取りまとめたものです。ここに至るまで、多くの方々からご助言、ご協力を賜りました。

指導教員である橋本親典教授には、本研究の遂行および本論文の執筆あたり、終始あたたかく、親切なご指導・ご鞭撻を賜りました。先生の“0を1にするための研究を目指せ”という御言葉には、大変感銘を受けました。筆者が今後研究生活を行っていくうえでの座右の銘にさせていただきます。また、多くの学会発表や研究委員会の活動の機会を与えて下さっただけでなく、筆者の私生活や就職活動にも特別のご配慮を頂きました。徳島に来てからの3年間、非常に充実した生活を送ることができました。ここに深く感謝し、心より御礼申し上げます。

上田隆雄教授には、本研究を遂行するにあたり、多くのご助言を賜りました。ここに深く感謝し、心より御礼申し上げます。先生の研究に対して真摯に取り組む姿勢は、今後、私が研究を行っていくうえでのお手本にさせて頂きたく存じます。また主査として学位審査の労をお取り頂きましたこと、重ねて御礼申し上げます。

徳島大学大学院 上月教授には副査として学位審査の労をお取り頂きました。ここに深く感謝し、心より御礼申し上げます。

渡辺 健准教授には、本研究の遂行および本論文の執筆にあたり、終始あたたかく親切なご指導・ご鞭撻を賜りました。筆者が研究活動や後輩の指導を行ううえで行き詰った時など、先生からはいつもの的確なご助言を頂くことができ、問題の解決に導いて頂きました。また、副査として学位審査の労をお取り頂きました。ここに深く感謝し、心より御礼申し上げます。

塚越雅幸助教授には、本研究を遂行するにあたり、多くのご助言を賜りました。また先生には、研究活動だけでなく私生活に至るまで特別のご配慮を賜りました。先生の明るい人柄のおかげで、私学生生活は豊かになりました。また、初めての調査研究会での活動に四苦八苦する私に対して、親切なご指導を賜りました。心より、御礼申し上げます。

石丸啓輔技官には、実験を行うにあたり、実験器具の準備や使用方法についてのご指導だけでなく、実験の際のトラブルへの対応など、多くのご助力を賜りました。筆者がこれまで実験を行ってこれたのは石丸様の存在があったからです。ここに深く感謝し、心より御礼申し上げます。

福岡大学 橋本紳一郎助教授には、筆者がまだ福岡大学に在籍していた当時から現在に至るまで常に気にかけて頂き、研究の面だけでなく生活の面でも特別の配慮を賜りました。また先生には、筆者が研究者の道を目指すきっかけを与えて頂きました。ここに深く感謝し、心より

御礼申し上げます。

徳島大学 水口裕之名誉教授には、研究調査委員会活動を通じて研究者としてあるべき姿を学ばせて頂きました。心より御礼申し上げます。

高知工業高等専門学校 横井克則教授ならびに近藤拓也准教授には、学会や見学会等で大変お世話になりました。心より御礼申し上げます。また、先生方の同僚として高知工業高等専門学校で働かせて頂けること、心より嬉しく存じます。今後とも何卒、ご指導・ご鞭撻のほどよろしくお願い申し上げます。

山全株式会社 光滝様ならびに井上様には、表面気泡抜き取り装置に関する研究の機会を与えて頂き、また実験計画や準備等、多くのご助力を賜りました。ここに付記し、深謝いたします。

本実験を遂行するにあたり、非鉄スラグ細骨材を土木学会コンクリート委員会2種委員会「非鉄スラグ骨材コンクリート研究小委員会」(委員長 宇治公隆 首都大学東京大学院 教授)より、高炉スラグ細骨材を土木学会コンクリート委員会3種委員会「高炉スラグ骨材コンクリート研究小委員会」(委員長 綾野克紀 岡山大学 教授)より提供して頂きました。ここに付記し、関係各位に謝意を表します。

本研究を進めるにあたり、青江君、岡君、福富君、浅野君をはじめとする徳島大学コンクリート工学研究ならびに維持再生工学研究室の皆様には、多くのご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

最後に、筆者が本研究に取り組むことができたのは父 一郎、姉 愛子、兄 芳久が応援してくれたおかげです。特に父 一郎からは、多くの方金的援助も賜りました。ここに付記し、深謝いたします。