

低炭素型高強度コンクリートの実用化に関する研究

メタデータ	言語: jpn
	出版者:
	公開日: 2018-06-06
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 鈴木, 好幸
	メールアドレス:
	所属:
URL	https://doi.org/10.15118/00009635

低炭素型高強度コンクリートの実用化に関する研究

2018年3月

鈴木 好幸

目次

第1章	序章		3
1. 1	研究(の背景と目的	3
1. 2	用語の	の定義	5
1. 3	論文の	の構成	5
第2章	既往の	研究	9
2. 1	はじと	めに	11
2. 2	関連	する規準・規格・法令における低炭素型コンクリートの取扱い	12
2.	2. 1	建築基準法	12
2.	2. 2	日本工業規格	14
2.	2. 3	住宅の品質確保の促進等に関する法律(住宅性能表示制度)	18
2.	2. 4	建築関連の各種仕様書	20
2.	2. 5	土木学会 コンクリート標準示方書	24
2. 3	低炭素	素型コンクリートに関する既往の研究	27
2.	3. 1	高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート	27
2.	3. 2	フライアッシュを用いたコンクリート	34
2.	3. 3	産業副産物系混和材を大量置換した低炭素型コンクリート	38
2.	3. 4	高炉スラグ微粉末とフライアッシュを使用した 3 成分系低炭素型コンクリート	43
2. 4	建築物	物の環境影響評価手法に関する調査	46
2.	4. 1	ライフサイクルアセスメント(LCA)手法による評価	46
2.	4. 2	環境性能評価システム	49
2.	4. 3	環境ラベル	52
2.	4. 4	カーボンフットプリント(CFP)	53
2. 5	まと	め	56
第3章	低炭素	型高強度コンクリートの基本コンセプトと性能評価	61
3. 1	はじと	めに	63
3. 2	低炭素	素型高強度コンクリートの基本コンセプト	64
3.	2. 1	結合材の組合せ	64
3.	2. 2	目標性能	65
3. 3	性能記	评価	66
3	3 1	宝蛤凞要	66

68
75
75
79
89
91
93
95
96
96
100
108
118
121
125
125
126
126
126
127
135
139
141
143
143
146
148
149
151
153

第1章 序 章

第1章 序章

1. 1 研究の背景と目的

近年,持続可能・低炭素型社会の構築に向けて,地球規模での温暖化防止に向けた動きが加速しつつある。わが国においても,第21回国連気候変動枠組条約締約国会議(COP21)に先立って,国内の排出削減・吸収量の確保により,2030年度に2013年度比26.0%減の水準とすることが約束草案として示された¹⁾。約束草案における温室効果ガス排出削減目標は,コスト面の課題などを十分に考慮した裏付けのある対策・施策や技術の積み上げによる実現可能な水準として全産業・分野を対象に設定されたものである。

建設業はエネルギーの消費量および CO2排出量が大きい産業であることが知られており、建築関連に限っても、住宅及び業務ビル用の資機材製造・建設・改修・運用・廃棄までのライフサイクルを通じての CO2排出量は、我が国全体の 40%を占めるとの試算もある ²⁾. つまり、温室効果ガス排出削減目標の達成には、建設業の果たす役割が非常に大きく、省エネ・創エネをはじめとする施策・技術の積上げによる削減努力はより一層加速するものと思われる.

我が国全体のエネルギー効率は、これまでの温室効果ガス削減の取組等により、既に先進国で最高水準にあるとの分析もあり、さらなる高い水準を達成するには、より具体的な施策と対策およびそれを実現させる要素技術の開発が急務であるといえる。その中で重要になるのは、ライフサイクルの各段階における CO2排出量の割合を把握し、施策と対策による削減効果を定量的に評価・分析し、より実現可能かつ効率的なものに磨き上げていくアプローチである。ライフサイクルを通じた環境負荷を定量的に評価する手法に関しては、ライフサイクルアセスメント(LCA)が一般的であり、ISO(国際標準化機構)による環境マネジメントの国際規格の中で関連規格が整備されており、LCA に対するニーズが高まるに伴いその評価水準は向上し続けている。しかしながら、我が国の建設業における LCA 手法の活用は、企業活動の社会的責任、いわゆる CSR への配慮において環境情報発信方法の一つとして取り込まれている事例がほとんどで、例えば個別の建築物を対象とした LCA による評価事例や評価手法の整備が十分に確立されているとはいえないのが現状である。

建築物のライフサイクルの各段階における CO2排出量は,運用段階の割合が高いことが知られており,近年までの建築分野における低炭素化に向けた取組みは,運用段階に係わる省エネ化や再生可能エネルギーの効果的な利用に重きが置かれてきた。また,運用段階の低炭素化は,運用コストの削減に繋がり,建築物の発注者への直接的なメリットとなるため,設計段階から詳細な評価を行い,受注者側から技術提案として積極的に検討するケースも増加してきている.

さらに、日本の CO₂削減目標を受けて、経済産業省では 2030 年までに新築全体での ZEB (ネット・ゼロ・エネルギー・ビル) の実現 3) を目標に掲げており、運用段階における省エネや再生可能エネルギ

一の利用による低炭素化技術の開発がよりいっそう加速していくと思われる。そうした中で、運用段階以外における CO2排出量(以下、建設に伴う CO2排出量)の割合は相対的に大きくなっていくことが想定される。そのため、近い将来、建設に伴う CO2排出量の削減が注目されることは必至であると考える。また、2012年12月4日に施行された「都市の低炭素化の促進に関する法律」⁴⁾では、「高炉セメント又はフライアッシュセメントを主要構造部に使用していること」が評価項目の1つに指定された。これは、我が国のセメント産業が、日本の温室効果ガス総排出量の約4%に相当する二酸化炭素を排出している産業であり、その排出削減対策が重要な課題となっていることを受けての対応といえる⁵⁾。主要な建設材料であるコンクリートを構成する重要な材料の一つがセメントであり、セメントは、製造時の焼成過程で多くのエネルギーが必要となることに加え、石灰石が主原料であることに起因する脱CO2反応による排出も考慮しなければならない。そのため、セメントの一部を高炉スラグ微粉末(以下、GGBFS)やフライアッシュ(以下、FA)などの副産物系混和材料で置換することで、低CO2化を図るアプローチがなされており、最近では、そうしたコンクリートを「低炭素型コンクリート」と称して、建設会社を中心に様々な技術開発が進められている。

しかしながら、建設会社主導の低炭素型コンクリート開発への取り組みは、セメントの代替として副 産物系混和材料を混入する概念は同じものの、建設会社ごとに混和材料の種類や置換率などの仕様が異 なるため、実際の製造にあたっては、レディーミクストコンクリート工場のサイロや貯蔵ビンの中身を 入れ替えたりする煩雑な作業が伴うことや、出荷期間中は特定の混和材料で設備の一部が占有状態とな るなど、製造者の負担増大に繋がることが危惧されている、そうした課題に対応するため、低炭素型コ ンクリートに使用される結合材中の GGBFS に代わって,多くのレディーミクストコンクリート工場で標 準的に貯蔵されている高炉セメント B 種(以下, BB)を用いることで, 製造側の貯蔵設備の負担を減ら すことができる概念も示されている ^{6), 7)}. その際, BB に FA を混合するような 3 成分系のコンクリート とすることで, BB 単体のコンクリートよりも, 同程度の力学性能を保持したまま, 温度ひび割れ, 乾燥 収縮ひび割れのリスクを低減できることが報告されている^{例えば8),9)}. その一方で, BB に FA を組み合わ せた低炭素型コンクリートは、FA の置換率が高くなるほど、中性化抵抗性が著しく低下することが明ら かとなっている^{例えば6),9)}. そのため,建築物への適用にあたっては,耐久設計の観点から地上躯体に適 用する際に多くの制約を受ける可能性があることを考慮しなければならない.一方で、近年、部材断面 の合理化等の観点から、超高層建築物以外の建築物へも使用箇所が拡張しつつある高強度コンクリート については、単位結合材量が多く組織が緻密であることから、混合セメントを用いても十分な中性化抵 抗性を確保できることが報告されている ¹⁰⁾.

このように、低炭素型コンクリートと称される副産物系混和材料でセメントの一部を置換したコンクリートでは、副産物系混和材料の組み合わせ、置換率および強度レベル等で特徴が異なる性質を持っている中で、それらの各性能が網羅的に整備されているとは言い難い、特に、近年での建築物の高層化や長寿命化に伴い急速に発展し、適用が拡大している高強度領域の性状に関する知見は極めて少ないのが現状である。今後、環境配慮設計として低炭素型コンクリートの適用を検討する場合にあっては、適用

箇所に求められる性能を十分に満たしたうえで最大限の CO_2 排出量削減が得られるように,高強度領域における低炭素型コンクリートの性能に関する知見の蓄積が必要であると考える.

そこで本研究では、前述の背景をふまえて、建築工事への低炭素型コンクリートの適用性拡大を目的として、汎用性と耐久性をそれぞれ確保した低炭素型コンクリートを提案すべく、BBにFAを置換した高強度領域の低炭素型コンクリートを対象に、基礎性状の把握から高品質化に向けた検証を行った。さらには、低炭素型コンクリートが実際に建築物の建設に伴うCO2排出量のうち、どの程度の削減効果であるかを評価する統一的なCO2排出量評価手法を提案し、対策技術とその評価をパッケージ化して環境配慮型設計へ組み込むことを視野に入れた検証を行い、その妥当性と課題について整理する.

1.2 用語の定義

本論文で使用する用語の定義を表 1-1 に示す.「低炭素型コンクリート」については、同様の意味を含んだもので「環境配慮型コンクリート」などの表現も一般的に使用されているが、本論文では参考文献の一部を除いて、「低炭素型コンクリート」に統一して使用する.

用語	説明
低炭素型コンクリート	セメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュに代表される産業副
	産物系混和材で置換した結合材で構成されるコンクリートの総称で, コンク
	リートの CO₂排出量削減効果が期待できるものとする.
低炭素型高強度コンクリ	上記「低炭素型コンクリート」のうち,高強度領域のものとする. ここでい
- ト	う高強度領域とは,日本建築学会 JASS5 の「高強度コンクリート」の定義
	に準拠した設計基準強度で 36N/mm² を超えるものとする.

表 1-1 本論文における用語の定義

1.3 論文の構成

本論文は本章を含み7章より構成されており、図1-1に論文構成を示す.

第1章は、「序章」である。本研究の背景および目的について述べるとともに、本論文の構成について述べている。

第2章は、「既往の研究」である。低炭素型コンクリートの実用化にあたって関連する規準・規格・法令上の現状の取扱いについて整理した。また、本論文の位置づけを明確にするために、従来から進められている混合セメント型のコンクリートの研究を概観し、その特徴について整理するとともに、最新の研究動向について調査し、必要な情報を抽出した。さらに、実際に低炭素型コンクリートを建築物に適

用した場合を想定して,建築物全体の CO_2 排出量削減への貢献度を正しく評価するために必要な,環境影響評価手法の現状を整理し,ISO タイプIIIの環境ラベルに分類されるカーボンフットプリントを活用することで,透明性・信頼性を確保した評価として有効になり得る可能性を示した.

第3章は、「低炭素型高強度コンクリートの基本コンセプトと性能評価」である。第2章で得た知見を踏まえて、本研究で具体的に検証を進めた低炭素型高強度コンクリートの位置づけおよび基本コンセプトを示した。また、強度特性、耐久性および発熱特性といった高強度コンクリートとして把握すべき性能を室内実験により検証したうえで、実際の建築工事への適用を想定した実機実験を実施し、高温履歴の影響による強度停滞現象が起こることを示し、経済性・CO2排出量の両面からの影響を考慮したときに大きな課題となることを示した。

第4章は、「低炭素型高強度コンクリートの長期強度性状の改善」である。第3章で抽出された課題である高温履歴をうけることで長期強度が停滞する現象について、既往の研究をレビューしながらそのメカニズムの解明に向けていくつかのシリーズに分けて検討した。そして、それらの検討結果を踏まえて、実用化にあたっての改善手法に関する提案を述べた。

第5章は、「建築物の建設に伴う CO_2 排出量評価手法の提案」である。第2章で整理した建築物を対象とした環境影響評価手法の現状を踏まえて、CFPを活用した建築物の建設に伴う CO_2 排出量評価手法を提案し、その妥当性について検証した。

第6章は、「CFP を活用した低炭素型コンクリート適用による CO_2 排出量削減効果の検証」である。第5章で提案した CFP を活用した CO_2 排出量評価手法を用いて、各種低炭素型コンクリートの種類、適用部位による CO_2 削減効果の検証を行った。さらに、第4章で提案した長期強度性状の改善が実際に CO_2 排出量削減効果にどの程度影響するのかを検証した。

第7章は、「総括」である。各章で明らかになった事項を要約し、本研究の総括を行うとともに、今後の課題と展望について述べている。

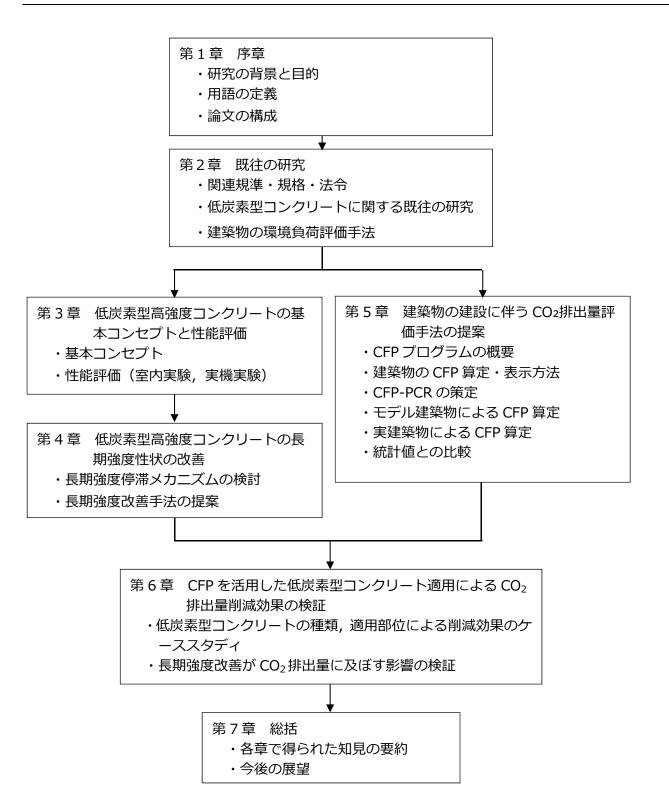


図 1-1 論文の構成

- 第1章の参考文献 -

- 1) 環境省 HP: 「日本の約束草案」の地球温暖化対策推進本部決定について,報道発表資料 http://www.env.go.jp/press/101241.html (2015年7月)
- 2) 伊香賀俊治: 建築物の LCA・LCC 手法の国・自治体・民間での活用状況, 日本 LCA 学会誌 Vol.4, No.1, pp.19-26, 2008
- 3) 経済産業省 省エネルギー庁 HP: ZEB ロードマップとりまとめ,省エネルギーについて http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/zeb_report/(2016年2月)
- 4) 国土交通省 HP: 都市の低炭素化の促進に関する法律(略称: エコまち法), 都市計画 http://www.mlit.go.jp/toshi/city_plan/eco-machi.html (2012 年 12 月)
- 5) 経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課:セメント産業における非エネルギー起源二酸化炭素対策に関する調査-混合セメントの普及拡大方策に関する検討-報告書,平成20年度経済産業省委託事業,平成21年3月
- 6) 黒田泰弘ら: 高炉セメントとフライアッシュを混合使用した低炭素コンクリートに関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013
- 7) 齋藤尚ら: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンハイパフォーマンスコンクリートの実構造物への適用,第4回コンクリート技術大会(長岡)技術講演会,2014年9月
- 8) 齋藤淳ら: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートのひび割れ抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013
- 9)(財)福井県建設技術公社:「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」(温度ひび割れ・乾燥収縮ひび割れ低減型コンクリート)配合・製造および施工指針(案),産学官共同研究報告書,平成19年3月
- 10) 吉田泰ら:環境配慮型超高強度コンクリートに関する研究(その4耐久性),日本建築学会学術講演梗概集.A-1,材料施工2011,pp.211-212,2011.7

第2章 既往の研究

第2章 既往の研究

2. 1 はじめに

低炭素型コンクリートは、セメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュに代表される産業副産物系混和材で置換した結合材で構成されるコンクリートであり、高炉セメント・シリカセメント・フライアッシュセメントといった JIS に制定される混合セメントを用いたコンクリートも含まれる.

現在国内で販売・使用されている混合セメントは高炉セメントが約9割以上を占め、シリカセメントは2010年以降殆ど生産されず、フライアッシュセメントは1%に満たない状況である¹⁾.

本章では、低炭素型コンクリートの実用化に向けた検討を進めるにあたり、関連する規準・規格・法令における取扱いに関する調査し、低炭素型コンクリートの位置づけを明確にする。そして、高炉セメントを中心とした代表的な混合セメントを含めて、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを使用したコンクリートの特性を整理することで、低炭素型コンクリートを建築工事に適用するにあたっての課題ならびに解決策を抽出する。

さらに、近年研究が積極的に進められている高炉スラグ微粉末を大量置換した低炭素型コンクリートや、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを使用した3成分系の低炭素型コンクリートに関する調査を行い、次章以降で取り上げる高強度領域の低炭素型高強度コンクリートの基本コンセプトの設定根拠となり得る知見を抽出する.

また、低炭素型コンクリートを適材適所への効果的に展開していくことを目指して、建築物としての CO_2 排出量の削減効果を評価する方法として適当な手法を導出するため、ライフサイクルアセスメント 手法を中心とした環境影響評価手法に関する調査や、実際に運用されている建築物の環境影響評価制度 の特徴や課題を抽出し整理した。それらの調査結果に基づき、5 章以降での建築物の建設に伴う CO_2 排出量の評価手法の提案に繋げた。

2. 2 関連する規準・規格・法令における低炭素型コンクリートの取扱い

2. 2. 1 建築基準法

建築基準法におけるコンクリートの取扱いに特に関連する項目を抜粋して表 2-2-1 に示す. 低炭素型コンクリートにあっても、建築工事への適用にあたっては同関連項目に全て準拠することが原則となる. 法第 37 条第一号では、建築材料のうち大臣が指定するものについては、それぞれ適切な JIS 等規格によることとしている. ここで適合とあるのは、必ずしも JIS 等規格のマークが付された材料のみを要求しているのではなく、JIS 等規格の内容に適合していると認められるものであれば JIS 等規格のマークが付されていない材料についても規定上は使用できる。すなわち、コンクリートにおいては、JIS A 5308(レディーミクストコンクリート)が参照されるが、JIS A 5308「7.4 混和材料」においてそれぞれのJIS 規格に適合することを求められているフライアッシュ、膨張材、化学混和剤、防せい剤、高炉スラグ微粉末およびシリカフュームは、それぞれ同 JIS 規格中で要求される品質を満足しているものであれば指定建築材料として扱える.

なお、JIS A 5308「7.4 混和材料」で規定されていない混和材料(躯体防水剤、収縮低減剤、水中不分離剤など)についても、コンクリート及び鋼材に有害な影響のない性質のものであれば、購入者と協議の上で混入して用いることができる場合があることが建築物の構造関係技術基準解説書 2015 年版(国土交通省住宅局建築指導課監修)²⁾で示されている。ただし、このような場合にも令第72条(コンクリート材料)や令第74条(コンクリートの強度)など、令第3章第6節の規定は適用される。

表 2-2-1 建築基準法によるコンクリートの取扱い関連項目の抜粋

建築基準法第 37 条	建築物の基礎、主要構造部その他安全上、防火上又は衛生上重要である政令で定める部分に使用する木材、鋼材、コンクリートその他の建築材料として国土交通大臣が定めるもの(以下この条において「指定建築材料」という。)は、次の各号の一に該当するものでなければならない。 - その品質が、指定建築材料ごとに国土交通大臣の指定する日本工業規格又は日本農林規格に適合するもの 前号に掲げるもののほか、指定建築材料ごとに国土交通大臣が定める安全上、防火上又は衛生上必要な品質に 関する技術的基準に適合するものであることについて国土交通大臣の認定を受けたもの
建築基準法施行令第 72 条	鉄筋コンクリート造に使用するコンクリートの材料は、次の各号に定めるところによらなければならない。 一 骨材、水及び混和材料は、鉄筋をさびさせ、又はコンクリートの凝結及び硬化を妨げるような酸、塩、有機物又は泥 土を含まないこと。 二 骨材は、鉄筋相互間及び鉄筋とせき板との間を容易に通る大きさであること。 三 骨材は、適切な粒度及び粒形のもので、かつ、当該コンクリートに必要な強度、耐久性及び耐火性が得られるもので あること。
建築基準法施行令第 74 条	鉄筋コンクリート造に使用するコンクリートの強度は、次に定めるものでなければならない。 - 4週圧縮強度は、12N/mm²(軽量骨材を使用する場合においては、9N/mm2)以上であること。 二 設計基準強度(設計に際し採用する圧縮強度をいう。以下同じ。)との関係において国土交通大臣が安全上必要であ ると認めて定める基準に適合するものであること。
建築基準法第2条	
建築基準法施行令第 144条の3	〈建築基準法第37条でいう安全上、防火上又は衛生上重要である建築物の部分〉 法第37条の規定により政令で定める安全上、防火上又は衛生上重要である建築物の部分は、次に掲げるものとする。 一構造耐力上主要な部分で基礎及び主要構造部以外のもの 二耐火構造、準耐火構造又は防火構造の構造部分で主要構造部以外のもの 三第109条に定める防火設備又はこれらの部分 四建築物の内装又は外装の部分で安全上又は防火上重要であるものとして国土交通大臣が定めるもの 五主要構造部以外の間仕切壁、揚げ床、最下階の床、小ばり、ひさし、局部的な小階段、屋外階段、バルコニーその他 これらに類する部分で防火上重要であるものとして国土交通大臣が定めるもの 六建築設備又はその部分
平成 12 年 1446 号 〔建築基準法関係告 示〕	〈建築物の基礎、主要構造部等に使用する建築材料並びにこれらの建築材料が適合すべき日本工業規格又は日本農林規格及び品質に関する技術的基準を定める件〉 建築基準法(昭和25年法律第201号)第37条の規定に基づき、建築物の基礎、主要構造部等に使用する建築材料並びにこれらの建築材料が適合すべき日本工業規格又は日本農林規格及び品質に関する技術的基準を次のように定める。 第1 建築基準法(以下「法」という。)第37条の建築物の基礎、主要構造部その他安全上、防火上又は衛生上重要である部分に使用する建築材料で同条第一号又は第二号のいずれかに該当すべきものは、次に掲げるものとする。 セ コンクリート
別表第 1(法第 37 条 第一号の日本工業規 格又は日本農林規 格)	第1第七号に掲げる建築材料: JIS A 5308(レディーミクストコンクリート) – 2003(JIS R5214(エコセメント) – 2002 に規定する普通エコセメントを使用するものを除く。)

2. 2. 2 日本工業規格

前項で示したとおり、低炭素型コンクリートを建築工事へ適用するにあたっては、JIS A 5308 (レディーミクストコンクリート) に適合したコンクリートであることが一般的な条件となる。JIS A 5308-2014 において、使用可能なセメントの種類として、下記の 5 種類が規定されている。

- 1) JIS R 5210 ポルトランドセメント
- 2) JIS R 5211 高炉セメント
- 3) JIS R 5212 シリカセメント
- 4) JIS R 5213 フライアッシュセメント
- 5) JIS R 5214 エコセメント(高強度コンクリートには適用不可)

さらに、使用可能な混和材料の種類として、下記の6種類が規定されている.

- 1) JIS A 6201 フライアッシュ
- 2) JIS A 6202 膨張材
- 3) JIS A 6204 化学混和剤
- 4) JIS A 6205 防せい剤
- 5) JIS A 6206 高炉スラグ微粉末
- 6) JIS A 6207 シリカフューム

2.1 節で示したとおり、現在一般的に使用される混合セメントの多くが高炉セメントであることや、2.3 節で後述するように、最近の低炭素型コンクリートの研究動向においても、混和材料として高炉スラグ微粉末やフライアッシュを置換する仕様のコンクリートが主流であることを考慮すれば、基本的には JIS A 5308 に規定されるセメントおよび混和材料を組み合わせて低炭素型コンクリートを製造することで、建築基準法上の制限はないものと推察される.

但し、低炭素型コンクリートの普及拡大にあたって注意しなければならないのが、JIS A 5308-2014では「8.2 材料の計量」において、セメント、骨材、水及び混和材料は、それぞれ別々の計量器によって計量しなければならないと明記されており、セメントと混和材料の累加計量は認められていないという点である。これは、都市部の大型のレディーミクストコンクリート工場を除いて、多くの場合で粉体用の計量器を複数保有していないケースが多く、混和材料が製造設備上の制約から使用できない可能性があることになる。また、JIS A 5308-2014では、2 種類のセメントを結合材として用いることについては記述がなく、例えば、高炉セメントと普通ポルトランドセメントを組み合わせて高炉スラグ微粉末の量を調整しようと試みた場合に、そのコンクリートが JIS に適合するか否かについての別の判断根拠が必要になる可能性が想定される。これらは少なくとも、建築工事へ低炭素型コンクリートの普及拡大を目指すうえでの一つの障害となり得る。

(1) 高炉セメント, フライアッシュセメントの種類と要求品質規格

表 2-2-2 で示すように、高炉セメントおよびフライアッシュセメントでは、混合材の分量(質量%)によって、A 種、B 種、C 種に分類されている。表 2-2-3 に高炉セメントとフライアッシュセメントの要求品質を示すが、セメント種類毎に異なる要求品質が規定されているものもある。

表 2-2-2 高炉セメントとフライアッシュセメント種類による混合材分量の規定値

種類	高炉スラグの分量(質量%)	フライアッシュの分量(質量%)
A種	5 を超え 30 以下	5 を超え 10 以下
B種	30 を超え 60 以下	10 を超え 20 以下
C種	60 を超え 70 以下	20 を超え 30 以下

表 2-2-3 高炉セメントとフライアッシュセメントの JIS 要求品質

品質		高炉セメント			フライアッシュセメント			
		JIS R 5211			JIS R 5213			
		A種	B種	C種	A 種	B種	C種	
密度(g/cm³)	_	_	_	_	_	-	
比表面積(cn	n²/g)	3000以上	3000以上	3300以上	2500 以上	2500 以上	2500 以上	
凝結	始発(min)	60 以上	60 以上	60 以上	60 以上	60 以上	60 以上	
/失此不口	終結(h)	10以下	10 以下	10 以下	10 以下	10 以下	10 以下	
	パット法	良	良	良	良	良	良	
安定性	ルシャテリエ法 (mm)	10以下	10以下	10以下	10以下	10以下	10以下	
厂《京2公士	3d	12.5 以上	10.0 以上	12.5 以上	10.0以上	7.5 以上	7.5 以上	
圧縮強さ (N/mm²)	7d	22.5 以上	17.5 以上	22.5 以上	17.5 以上	15.0 以上	15.0 以上	
(N/IIIIII)	28d	42.5 以上	42.5 以上	42.5 以上	37.5 以上	32.5 以上	40.0以上	
化学出分	酸化マグネシウム	5.0 以下	6.0以下	5.0 以下	5.0 以下	5.0 以下	6.0以下	
化学成分 (%)	三酸化硫黄	3.5 以下	4.0 以下	3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下	4.5 以下	
	強熱減量	5.0 以下	5.0 以下	5.0 以下	_	-	5.0以下	

(2) 高炉スラグ微粉末, フライアッシュの種類と要求品質規格

表 2-2-4, 表 2-2-5 に高炉スラグ微粉末とフライアッシュの種類と要求品質をそれぞれ示す. 高炉スラグ微粉末は比表面積によって定まる 4 つの種類がある. 比表面積が大きいほど反応性が高く, 強度や耐久性工場などの目的に応じて混合率を調整して使用できるように整備されている. 現状で最も生産量が多いのは高炉スラグ微粉末 4000 であり, 高炉セメントにもこの 4000 相当が使用されることが一般的である. 6000 は, 初期強度を必要とするコンクリート製品などに使用されることが多く, 8000 はその細かさを活かして充填剤などに利用されている 3). 一方, マスコンクリートの温度上昇抑制や収縮を小さくする場合には比表面積が小さい方が適しており, 2013 年の JIS 改正で新たに 3000 が規格化された.

フライアッシュは、主に発現強度と流動性から I ~IV種に等級化されている。また、強熱減量は未燃炭素含有量の目安を与えるものであり、未燃炭素が多いほど流動性の低下に加えて、空気の連行に影響を与えるため、種類毎にその規定値が定められている。2.1 節で述べたとおり、フライアッシュセメントの生産量は極めて少なく、フライアッシュの利用は混和材料として用いられることが多いが、日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事」などにおいて、フライアッシュを結合材として用いる場合は、 I 種または II 種に限定されており、さらに II 種にあっても JASS5 M-401 に規定される品質基準を満足することが要求される(表 2-2-6)4)。

表 2-2-4 高炉スラグ微粉末の種類と JIS 要求品質 (JIS A 6206)

品質		高炉スラグ微	高炉スラグ微	高炉スラグ微	高炉スラグ微
		粉末 3000	粉末 3000 粉末 4000 粉末 6000		粉末 8000
密度(g/cm³)		2.80 以上	2.80 以上	2.80 以上	2.80 以上
比書面籍 (cm²)	/a)	2750 以上	3500 以上	5000 以上	7000 以上
LI衣叫付(CIII /	比表面積(cm²/g)		5000 未満	7000 未満	10000 未満
活性度指数	材齢7日	_	55 以上	75 以上	95 以上
(%)	材齢 28 日	60 以上	75 以上	95 以上	105 以上
(70)	材齢 91 日	80 以上	95 以上	-	_
フロー値比(%)	95 以上	95 以上	90 以上	85 以上
酸化マグネシウ.	ム (%)	10.0以下	10.0以下	10.0以下 10.0以下	
三酸化硫黄(%)		4.0 以下	4.0以下	4.0以下	4.0 以下
強熱減量(%)		3.0以下	3.0以下	3.0以下	3.0 以下
塩化物イオン(%)	0.02 以下	0.02以下	0.02以下	0.02 以下

表 2-2-5 フライアッシュの種類と JIS 要求品質 (JIS A 6201)

百日		フライアッシュ	フライアッシュ	フライアッシュ	フライアッシュ		
- 現日 	項目		Ⅱ種	Ⅲ種	Ⅳ種		
二酸化けい素含を			45.0	以上			
湿分(%)			1.0	以下			
強熱減量(%)		3.0 以下	5.0 以下	8.0 以下	5.0 以下		
密度(g/cm3)	密度(g/cm3)		1.95以上				
	網ふるい方法	10 以下	40 以下	40 以下	70 以下		
粉末度	(45µm ふるい残分)(%)	10 以 1					
初入及	ブレーン方法	5000以上	2500以上	2500以上	1500 以上		
	(比表面積)(cm²/g)	3000 攻土			1300 攻工		
フロー値比(%)		105以上	95 以上	85 以上	75 以上		
活性度指数	材齢 28 日	90 以上	80 以上	80 以上	60 以上		
(%)	材齢 91 日	100以上	90 以上	90 以上	70 以上		

表 2-2-6 結合材として用いるフライアッシュの品質基準(JASS 5 M-401)⁴⁾

	項 目	品質基準
強熱減量(%)		4.0 以下
粉末度	比表面積(cm²/g)	3000以上
フロー値比(%)		100以上

2. 2. 3 住宅の品質確保の促進等に関する法律(住宅性能表示制度)

平成 12 年4月に施行された「住宅の品質確保の促進等に関する法律」(以下,品確法)では,住宅の諸性能を各等級でランク付けする住宅性能表示制度が制定されている。本制度は,住宅購入者及び住宅供給者が第三者機関に評価を委託する任意制度だが,住宅供給者は同制度を利用し購入者への性能情報開示を進めている。現状は,最高ランクを取得していることが税制優遇措置などのインセンティブを受けられる条件になる場合があることや,資産価値向上に直結することなどから,共同住宅などでは最高ランクを取得できることが必須の条件となりつつある。

同制度上のコンクリート構造物の耐用年数を評価する劣化対策等級では、各等級に最小かぶり厚さと水セメント比(W/C)の最大値が規定されている。ここで混合セメントに関して個別の設定がなされており、高炉セメントを使用する場合は、中性化速度がポルトランドセメントと異なることから、水セメント比の算定において、「混合物の10分の3を除いた部分をその質量として用いること」が規定されている。さらに、フライアッシュセメントを使用する場合は、「混合物の全量を除くこと」が規定されている。従って、高炉セメントやフライアッシュ使用時は、ポルトランドセメントよりも水セメント比を混合比率に応じて小さくする必要があり、生コン単価が割高になることから混合セメントの適用への大きな障害となっている。

このような現状に対して鐵鋼スラグ協会では、建築工事において高炉セメントが最も多用されている地下構造物に対しては、一定の条件を満足すればポルトランドセメントと同じ水セメント比の算定方法で、同等の耐久性が確保できるように、特別評価方法の申請を行い、平成 14 年 10 月 1 日に国土交通省より認定書が公布されており、運用方法や認定書における適用条件を鐵鋼スラグ協会 HP 上で公開している 5). 同認定書における高炉セメントB種の適用条件を次に示すとおりである.

- (1)地下に存する部分(直接外気に接する部分を除く。)について適用する。
- (2)高炉セメント B 種 (高炉スラグの分量が質量比で 45%以下のものに限る。)を使用したコンクリートが用いられていること。
- (3)直接土に接する部分は、最小かぶり厚さが告示より 1cm 増しであること。また、直接土に接しない部分は、最小かぶり厚さが告示より 2cm 増しであること。

なお、平成27年度建築基準整備促進事業「M1混合セメント等を使用したコンクリートの水セメント比の評価方法に関する検討」⁶⁾ において、環境配慮の観点から、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いたコンクリートを建物躯体へ活用し、躯体の低炭素化を図る必要があるといった背景から、品確法における、混合セメント等を使用したコンクリートの水セメント比の評価方法における混合物の中性化抵抗性寄与率の妥当性についての実験的検証がなされている。その報告によると、表 2-2-7 に示すように、フライアッシュは現行基準では中性化抵抗性寄与率が0として評価されているのに対し、フライ

アッシュ B 種, C 種相当の実験による検証結果が 0~0.42 の範囲であり現行基準は妥当であること, 高 炉スラグ微粉末の場合は, 現行基準が 0.7 に対し, A 種で 1.0, B 種で 0.8, C 種で 0.4~0.7 でと現行 基準以上の中性化抵抗性寄与率が得られ, 水セメント比の評価方法における混合物から除く割合を緩和 できる可能性があることが示唆されている. さらに, 杭, 基礎への適用にあたっての検証では, 表 2-2-8 に示すように, 中性化深さの予測値と現行基準の最小かぶり厚さを精査した結果から, 高炉スラグ微粉 末置換率 70%以下の範囲, フライアッシュ置換率 25%以下の範囲において, 高炉スラグ微粉末とフライアッシュのすべての質量を水セメント比の計算に組み込むことができることが示された.

衣 2-2-7 成和例の中は心域がはの司子卒						
結合材	混和材	混合セメ	混和材の)中性化抗	氐抗性の	寄与率α
	混合率			水結合	計材比	
種類	(%)	ント規格	30%	40%	50%	60%
N+FA	15	B種相当	_	0.42	0.21	0.07
	25	C種相当	_	0.17	0.07	0.00
	30	A種相当	_	1.04	1.06	1.07
N+BFS	50	B種相当	_	0.84	0.84	0.83
	70	○種相当	0.45	0.59	0.69	_

表 2-2-7 混和材の中性化抵抗性の寄与率 4)

表 2-2-8 中性化深さの予測値と現行基準の最小かぶり厚さの比較

高炉スラグ微粉末|高炉スラグ微粉末|高炉スラグ微粉末|最小かぶり

普通ポルト

年数	(%)	ランドセメント	置換率30%	置換率50%	置換率70% 厚さ(mm))
30		11.1	15.4	20.1	24.3	
60	50	15.6	21.8	28.5	34.3	
90		19.2	26.7	34.9	42.0	
30		13.3	18.1	24.3	27.1	
60	55	18.9	25.6	34.3	38.3 (D)	
90		23.1	31.3	42.0	47.0	
(世田)	W/R	一 本 通 ポルト	フライアッシュ	フライアッド・コ		
供用 年数	W/B (%)	普通ポルト ランドセメント	フライアッシュ 置換率15%	フライアッシュ 置換率25%	最小かぶり 厚さ(mm)	
					厚さ(mm)	
年数		ランドセメント	置換率15%	置換率25%	厚さ(mm)	
年数 30	(%)	ランドセメント 11.1	置換率15% 14.4	置換率25% 18.9	厚さ(mm)	
年数 30 60	(%)	ランドセメント 11.1 15.6	置換率15% 14.4 20.4	18.9 26.7	厚さ(mm) 60 (イ)	
年数 30 60 90	(%)	ランドセメント 11.1 15.6 19.2	置換率15% 14.4 20.4 25.0	置換率25% 18.9 26.7 32.7	厚さ(mm)	

2.2.4 建築関連の各種仕様書

(1) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事(2015)⁷⁾

JASS5 において、低炭素型コンクリートに関連する記述として、「4節 コンクリートの材料」でのセメントに関する記述で、計画供用期間の級が長期(大規模補修不要予定期間としておよそ 100 年)の場合について、ポルトランドセメントもしくは混合セメントの A 種の使用を原則としている。さらに、超長期(大規模補修不要予定期間としておよそ 200 年)では、ポルトランドセメントの使用を原則としている。但し、解説文中では、「水セメント比の補正やかぶり厚さの増加などの対策によって、中性化の進行による鉄筋腐食のおそれを少なくできるならば、高炉スラグ高含有セメントなどのように、他の種類のセメントを使用してもよい」としている。

表 2-2-9 JASS5 における低炭素型コンクリート関連記述抜粋 ⁷⁾

4節 コンクリートの材料

4.2 セメント

- a.セメントは JIS R 5210(ポルトランドセメント), JIS R 5211 (高炉セメント), JIS R 5212 (シリカセメント) または JIS R 5213 (フライアッシュセメント) に適合するのもとする.
- c.計画供用期間の級が長期の場合,使用するセメントは, 上記a.のうち JIS R 5210 (ポルトランドセメント), もしくは JIS R 5211 (高炉セメント), JISR5212 (シリカセメント), または JIS R 5213 (フライア ッシュセメント) のうち A 種に適合するものを, 計画 供用期間が超長期の場合, JIS R 5210 (ポルトラン ドセメント) に適合するものを原則とする.

c. 計画供用期間の級が長期および超長期の場合に使用す るコンクリートの耐久設計基準強度は、それぞれ30N/mm² および 36N/mm² と規定されているため, 水セメント比は, 一般の建築工事に使用されているコンクリートよりも小さ くなり、コンクリートの強度・耐久性も向上すると考えら れる. しかし, 計画供用期間の級に対応するコンクリート 強度の下限値は、コンクリートの中性化速度を基礎として いるため, セメント種類による中性化速度の違いを考慮し なければならない. このため, 計画供用期間の級が長期の 場合, JIS R 5210 (ポルトランドセメント), もしくは JIS R 5211 (高炉セメント), JISR5212 (シリカセメン ト), または JIS R 5213 (フライアッシュセメント) のう ち A 種に適合するものを, 計画供用期間が超長期の場合, JIS R 5210 (ポルトランドセメント) を使用することと した. [中略] **水セメント比の補正やかぶり厚さの増加など** の対策によって、中性化の進行による鉄筋腐食のおそれを 少なくできるならば、高炉スラグ高含有セメントなどのよ うに,他の種類のセメントを使用してもよい.

また,「5節 調合」では,構造体強度補正値 28 S 91 の標準値として表 2-2-10 が,水セメント比の最大値として表 2-2-11 がそれぞれ示されており,フライアッシュセメントと高炉セメントの位置づけが明確になっている.

表 2-2-10 JASS5 表 5.1 構造体強度補正値 $28\,\mathrm{S}\,91\,$ の標準値 $^{7)}$

	コンクリートの打込みから 28 日ま					
セメントの種類	での期間の予想平均気温0の範囲					
	(\mathcal{C})					
早強ポルトランドセメント	0≦⊖<5	5≦⊖				
普通ポルトランドセメント	0≦⊖<8	8≦⊖				
中庸熱ポルトランドセメント	0≦⊖<11	11≦Θ				
低熱ポルトランドセメント	0≦⊖<14	14≦⊖				
フライアッシュセメントB種	0≦⊖<9	9≦⊖				
高炉セメントB種	0≦⊖<13	13≦⊖				
構造体強度補正値 28S91 (N/mm²)	6 3					

[注] 暑中期間における構造体強度補正値 28S91 は 6N/mm² とする。

表 2-2-11 JASS5 表 5.2 水セメント比の最大値 ⁷⁾

	セメントの種類	水セメント比の最大値(%)			
	ピグントの程規	短期・標準・長期	超長期		
	早強ポルトランドセメント				
ポルトランド	普通ポルトランドセメント	65	55		
セメント	中庸熱ポルトランドセメント				
	低熱ポルトランドセメント	60			
	高炉セメントA種				
	フライアッシュセメントA種	65			
混合セメント	シリカセメントA種				
ルロピグクト	高炉セメントB種				
	フライアッシュセメントB種	60			
	シリカセメントB種				

「8節 養生」および「9節 型枠工事」においては、湿潤養生の期間が表 2-2-12 に、基礎・梁側・柱および壁のせき板の存置期間を定めるためのコンクリートの材齢が表 2-2-13 のように示されている。これらの数値の根拠として、高炉セメントやフライアッシュセメントは初期乾燥防止ならびに中性化進行抑制の観点から特に初期養生の重要性が高いことや、普通ポルトランドセメントに比べて初期強度の発現が遅い傾向にあることが挙げられている。

表 2-2-12 JASS5 表 8.1 湿潤養生の期間

	計画供用期間の級	短期	長期
		および	および
セメントの種類		標準	超長期
早強ポルトランドセメント		3 日以上	5 日以上
普通ポルトランドセメント		5 日以上	7日以上
中庸熱および低熱ポルトランドも	Zメント	7 日以上	10 日以上
高炉セメントB種, フライアッシ	シュセメントB種	/ 口以上	10 口以上

表 2-2-13 JASS5 表 9.2 基礎・梁側・柱および壁のせき板の 存置期間を定めるためのコンクリートの材齢

	コンクリートの材齢(日)							
セメント		普通ポルトランドセメント	高炉セメント B 種					
の種類	早強ポルトラ	高炉セメント A 種	シリカセメント B 種					
	ンドセメント	シリカセメント A 種	フライアッシュセメント B 種					
平均気温		フライアッシュセメント A 種						
20℃以上	2	4	5					
20℃未満 10℃以上	3	6	8					

(2) 公共建築工事標準仕様書(建築工事編) 8)

公共建築工事標準仕様書(建築工事編)平成28年版では、「6章 コンクリート工事」において、一般的なコンクリートで特記がない場合には、普通ポルトランドセメント又は混合セメントのA種のいずれかとするとされている。但し、場所打ちコンクリート杭では、特記がなければ高炉セメントB種とするとしている。その他、構造体強度補正値28S91の標準値など、調合に係わる記述は、JASS5と概ね整合している。

表 2-2-14 「公共建築工事標準仕様書(建築工事編)」における低炭素型コンクリート関連記述抜粋

項目	関連記述
4章 地業工事	(b)コンクリート
5節 場所打ちコンクリート杭地業	(1)セメントは, 6.3.1 [コンクリートの材料] (a)により, 種類は特記による。
4.5.3 材料その他	特記がなければ,高炉セメントB種とする.
6 章 コンクリート工事	(1)セメントは, JIS R 5210, JIS R 5211, JIS R 5212, JIS R 5213, JIS R
3 節 コンクリートの材料及び調合	5214 により,種類は特記による.特記がなければ,普通ポルトランドセメン
6.3.1 コンクリートの材料	ト又は混合セメントのA種のいずれかとする.
(a)セメント	(2) 高炉セメントB種又はフライアッシュセメントB種の適用箇所は,特記
	により, 品質は次による。
	(i) 高炉セメントB種の高炉スラグの混合比は 40%以上とする。
	(ii) フライアッシュセメントB種のフライアッシュの混合比は 15%以上
	とする。
	(iii)(i)及び(ii)の混合比は,セメント製造業者のセメント試験成績表の
	値により確認する。
6 章コンクリート工事	(a) セメントの種類は,次により,適用は特記による.
13 節マスコンクリート	(1) 中庸熱ポルトランドセメント
6.13.2 材料及び調合	(2) 低熱ポルトランドセメント
	(3) 高炉セメントB種
	(4) フライアッシュセメントB種
	(5) 普通ポルトランドセメント
	(b)混和材料
	(2) 混和材を使用する場合は, JIS A 6201(コンクリート用フライアッシ
	ュ)によるフライアッシュの I 種若しくは II 種又は JIS A 6206(コンクリ
	ート用高炉スラグ微粉末)による高炉スラグ微粉末の 3000 若しくは
	4000 とする.

2. 2. 5 土木学会 コンクリート標準示方書

土木学会では、コンクリート標準示方書(以下、示方書と略記)[施工編:施工標準]3章⁹⁾において、 適切な材料の選定として、セメントや混和材に関する解説が記述されている。

「3章 材料」のセメントに関する記述において、混合セメントは JIS に適合する高炉セメントやフライアッシュセメントが標準とされ、特に一般的に流通している高炉セメント B 種は、アルカリシリカ反応や塩化物イオンの浸透の抑制に有効なセメントの一つであることが記されている。さらに、高炉セメント B 種は、かつては温度ひび割れ低減に効果があったものの、近年は初期強度を高めるために混合率および粉末度等が調整された結果、普通ポルトランドセメントよりも温度応力によりひび割れリスクが高くなる事例があることが示されている。

また、JIS に規定されていないセメントを使用する場合は、コンクリートに要求される性能を満足していることを、既往の実績工事の調査や事前に十分な試験を行うことによって確認したうえで選定することとされている。さらには、2 種類以上のセメントを混合することについても解説されており、コンクリートの性能に悪影響を及ぼさないことを事前に確かめる必要があるとされている。

「3.6.2 混和材」では、フライアッシュ、膨張材、高炉スラグ微粉末およびシリカフュームをコンク リート用混和材として使用する場合に、それぞれ JIS に適合したものを標準とすると示されている.

フライアッシュに関する解説では、品質の優れたフライアッシュを使用することで、ワーカビリティーの改善効果、水和熱による温度上昇の低減、長期材齢における強度増進、乾燥収縮の低減、水密性や化学的侵食に対する耐久性の改善、アルカリシリカ反応の抑制等、様々な優れた効果が期待できることが記されている。しかし、フライアッシュの品質は、微粉炭の品質、ボイラの燃焼方法、捕集方法等によってかなり相違することが指摘されており、そのため JIS A 6201 に適合したものを標準とすることとされている。

高炉スラグ微粉末に関する解説では、急冷したガラス質の高炉スラグを適切に粉砕して造った良質の高炉スラグ微粉末は、これを適切に用いれば、水和熱の発生速度を遅くすること、長期強度の増進、水密性を高め塩化物イオン等のコンクリート中への浸透抑制、硫酸塩や海水に対する化学抵抗性の改善、アルカリシリカ反応の抑制等、様々な優れた効果が期待できることをが記されている。しかし、これらの効果は、高炉スラグの化学成分や急冷の程度あるいは粉末度、石こう添加の有無、置換率、使用するセメントの性質および単位結合材量等によって大きく相違することが注意点として挙げられ、そのためJIS A 6206 に適合したものを標準とすることとされている。さらには、短所として、養生温度および養生期間を十分にとらないと、所定の強度が得られない場合や硬化体組織が粗になり、中性化速度の増加やひび割れ抵抗性が低下する等のおそれがあることが指摘されていることが示されている。

表 2-2-15 「コンクリート標準示方書・施工編」における低炭素型コンクリート関連記述抜粋 $^{9)}$

本文	解説
3 章 材料	・高温環境下では, コンクリートの温度上昇量とその後の温度降下に伴うひび
3.2 セメント	割れ発生を低減する目的で, 低熱, 中庸熱, 普通セメント及び混合セメントB
(2)セメントは JIS R 5210, JIS R 5211,	種を用いることが望ましい.
JIS R 5212, JIS R 5213及びJIS R 5214	・高炉セメントB種は, アルカリシリカ反応の抑制や塩化物イオンの浸透抑制
に適合したものを標準とする.	に有効なセメントであるが, 最近の高炉セメントB種は, スラグ混合率及び粉
	末度等によっては初期強度が大きくなるように調整されており,コンクリート
	の断熱温度上昇量が普通セメントよりも高くなる場合もあり,部材寸法や拘束
	条件,環境条件等によっては温度応力によるひび割れ発生が増加する事例が報
	告 されている. 高炉セメントB種には低発熱型のものもあるため, その使用に
	あたっては発熱性状等を確認するとともに,強度保証材齢を長期にとることが
	重要 である.
4 章 配合	・以下に示す 3 つの抑制対策(①コンクリート中のアルカリ総量の抑制、②
4.3 コンクリートの目標性能	アルカリ骨材反応抑制効果を持つ混合セメントの使用 、③アルカリシリカ反
4.3.4 耐久性	応性試験で区分 A「無害」と判断される骨材の使用) のうち、いずれか一つを
(4)アルカリシリカ反応に対しては, 適切	講じることによって、アルカリシリカ反応に対する耐久性は満足されたもの
な抑制対策を講じなければならない.	と見なすこととする.
	・②アルカリ骨材反応抑制効果を持つ混合セメントの使用 JIS R 5211「高炉
	セメント」に適合する 高炉セメントB種(スラグ混合率 40%以上)またはC
	種 、JIS R 5213「フライアッシュセメント」に適合する フライアッシュセメ
	ントB種(フライアッシュ混合率 15%以上)またはC種 を用いる.
	・なお、レディーミクストコンクリートを使用する場合には、これらの抑制対
	策のうち、①あるいは②を優先して実施するのが基本である.
12 章寒中コンクリート	・寒中コンクリートにポルトランドセメント及び 混合セメント B種 を用いるの
12.2 材料	を標準としているのは,低温下で養生してもコンクリートの初期材齢におけ
(1)セメントは, ポルトランドセメント及	る強度発現の遅延の程度が小さいからである.
び混合セメントB種を用いることを標準	
とする.	
14 章マスコンクリート	・一般的には, 中庸熱ポルトランドセメント, 低熱ポルトランドセメント, 高
14.2 材料	炉セメント, フライアッシュセメントなどの低発熱型のセメントを使用する
(1)セメント及び混和材料は,設計で定め	ことが望ましい . ただし, 高炉セメントの発熱性状は, 温度が高いほど促進
たものを用いることを原則とする.	される傾向にあることも十分に考慮して選定しなければならない。

示方書 [施工編:施工標準] 8章では、コンクリート打設後に必要な湿潤養生に関する解説が記述されている。特に高炉セメント B 種を使用した場合には、表 2-2-16 に示されるように、湿潤養生期間を普通ポルトランドセメントに比べて長くとる必要があることが、品質を確保するうえで重要な要素であることが示されている。

表 2-2-16 湿潤養生期間の標準 ⁹⁾

日平均気温	普通ポルトランドセメント	混合セメントB種	早強ポルトランドセメント
15℃以上	5日	7日	3日
10℃以上	7日	9日	4日
5℃以上	9日	12 日	5日

2. 3 低炭素型コンクリートに関する既往の研究

2. 3. 1 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート

現在、最も使用されている低炭素型コンクリートといえる高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの歴史は古く、鐵鋼スラグ協会が発刊している「高炉セメント百年史」¹⁰⁾ によると、クリンカーと高炉スラグの組み合わせによる高炉セメントは、1882年に G. Prüssing(独)が Vorwole セメント工場で生産したのが始まりであるといわれている。また同時期から水砕スラグに関する研究も進められ、1902年には、H.Passow(独)によってスラグの潜在水硬性覚醒にはアルカリ刺激が必要なことが証明された。次いで 1908年には、H.Kuhl(独)によって、石膏などの硫酸塩による刺激によっても、スラグの潜在水硬性が覚醒することが発見された。日本では、1901年に創業した官営八幡製鐵所が高炉スラグの有効利用を図るために、1913年から高炉セメントの製造を自らで行ったとされ、その後はセメント会社も、製鉄会社から高炉スラグの供給を受け、高炉セメントの製造を行うようになった。戦後になると、復興工事や高度経済成長の中でセメント需給が急激に増加するのに伴い、高炉セメントの製造量も増え、次第に汎用品として定着していったとされる(図 2-3-1)¹⁰⁾.

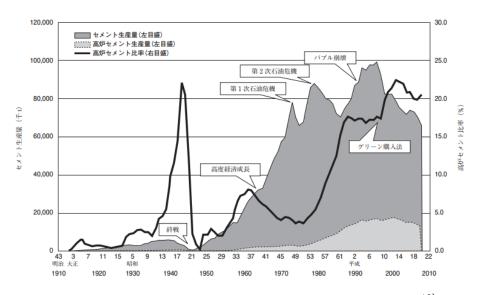


図 2-3-1 全国のセメント生産量と高炉セメント比率の推移 10)

そのような歴史背景から分かるように、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの研究はこれまで多く行われてきており、日本建築学会の標準仕様書や各種指針類、土木学会のコンクリート標準示方書などにその特性が整理されたうえで適切な選定根拠が示されてきた。特に、アルカリ骨材反応の問題が顕在化した1980年代には、アルカリ骨材反応への有効な対策として高炉セメントの積極的な活用が推進された。

最近では、地球温暖化抑制対策としての要求に呼応して、2017年9月に日本建築学会において、「高炉セメントを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説」(2001年,1989年,1981年,1978年初版)と「高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説」(2001年,1996年初版)の2つの指針を統合した「高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針(案)」¹¹⁾(以下、AIJ指針)が発刊された。このAIJ指針には、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの性質に関する最新の知見が整理されたことに加えて、新たに建築物に要求される性能の項目として環境配慮性が加えられ、高炉スラグを適切に使用する意義が明確化された。

具体的には、仕様設計に基づく構造体コンクリートの CO_2 削減等級として、表 2-3-1 に示す使用する セメントの種類に応じた等級区分を設定され、建築物の仕様を検討する段階において、発注者もしくは 設計者から目標の等級区分が提示されることにより、高炉スラグ微粉末の使用による CO_2 削減目標を設定することが容易になった.

表 2-3-1 高炉スラグコンクリートによる構造体コンクリートの CO₂ 削減等級 ¹¹⁾

区分	使用するセメントの種類					
	地上部分	地下部分				
等級 0	普通ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント				
一	自地バック・プント・ピグント・	A種・A種相当				
等級 1	普通ポルトランドセメント	B種・B種相当				
サ 州 ス エ	A種・A種相当	C種・C種相当				
	A種・A種相当	B種・B種相当				
等級 2	A7里・A7里作曲	C種・C種相当				
	B種・B種相当	B種・B種相当				
等級 3	_	_				

注) A種, B種, C種はそれぞれ, JIS R 6201 の高炉セメントの種類を示し, A種相当, B種相当, C種相当は AIJ 指針内で設定される高炉スラグ微粉末の使用率に応じて定義されたもの. (A 種相当: 20以上 30%以下, B種相当: 40以上 50%以下, C種相当 60以上 70%以下)

AIJ 指針では、高炉スラグ微粉末の粉末度と高炉スラグの使用率がコンクリートの性質の及ぼす影響を表 2-3-2 のように整理して示されている。耐久性については、いずれの組み合わせにおいても水和物中に水酸化カルシウムが少なくなることから、中性化抵抗性が劣る傾向にあることがわかる。また、温度ひび割れ抑制に効果がある断熱温度上昇量は、粉末度 3000 もしくは C 種または C 種相当の置換率でなければ劣ることがあるため注意を要する。一方で、耐塩害性や耐硫酸塩性に優れ、アルカリシリカ反応抑制の効果が顕著であるという長所がある。

表 2-3-2 高炉スラグ微粉末の比表面積と使用率がコンクリートの性質に及ぼす影響 11)

高炉スラグ 微粉末	種 類	高炉 微料 30	床	高炉スラグ 微粉末 4 000		高炉スラ 微粉末 6 000			高炉スラグ 微粉末 8000			
コンクリート	比表面積(cm²/g)	2 750 3 500		3 500 以上 5 000 未満)00 以)00 未		7 000 以上 10 000 未満			
性質	使用率(1)	30	50	30	50	70	30	50	70	30	50	70
フレッシュコンクリート の性質	流動性 ブリーディング 凝結遅延効果 ⁽²⁾	000	0 4	0 0 0	000	0 4 6	0	0 0	0	0	0	000
	断熱温度上昇 発熱速度低減	0 0	0 0	0) - ©	0 0	0	0	0	- 0	0	0 0
強度性状	初期強度 材齢 28 日強度 長期強度 高強度	1000	4001	0000	D 0 0 D	△ △ ◎ △	0000	0 0 0 0	△ ◎ ◎ ◎	0 0 0	0 0 0	0000
耐久性状	乾燥収縮 中性化 耐凍害性 水密性 塩分遮へい性 両海水性 耐酸性・耐硫酸塩性 耐熱性 アルカリシリカ反応抑制 耐摩耗性	0100000000	0 1 0 0 0 0 0 0 0	0 1 0 0 0 0 0 0 0 0	0 1 0 0 0 0 0 0 0 0	0400000000	0100000000	0 0 0 0 0 0 0 0	0400000000	0 0 0 0 0 0 0 0	0 - 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0

[記号] ◎:無混入コンクリートに比べて良好な性質が得られる.

^{○:}無混入コンクリートに比べて同程度または多少良好な性質が得られる.

^{△:}無混入コンクリートに比べて使用に際し注意を要する.

^{-:}条件により異なる. もしくは劣る場合がある.

[[]注](1) ここに示す使用率の中間的な値で高炉スラグ微粉末を使用した場合のコンクリートは、それぞれほぼ中間的な性質を示す。

⁽²⁾ 凝結遅延効果とは、コンクリートの凝結を遅らす効果を示し、夏期に施工性を確保するために有効である.

高炉セメント・高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのフレッシュコンクリートの性質を表 2-3-3 に、硬化コンクリートの性質を表 2-3-4 に整理して示す。

表には、主に一般的な性質として従前から知られているものを中心に示したが、最近では、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの収縮ひび割れ制御に関する検討が進められ、図 2-3-2 に示すように、高炉セメント B 種相当のセメントを用いたコンクリートの乾燥開始前およびその後の収縮拘束応力の発現の傾向が環境温度により大きく異なり、特に夏期を想定した環境温度 30℃(B30)で収縮拘束応力の増加が著しいことが閑田ら ¹⁸⁾によって実施された実験的検討により明らかにされている。また、図 2-3-3に示すように乾燥収縮ひずみについても同様に、普通ポルトランドセメントを使用した場合と比較して環境温度の影響を受け易い特徴があるといえる。

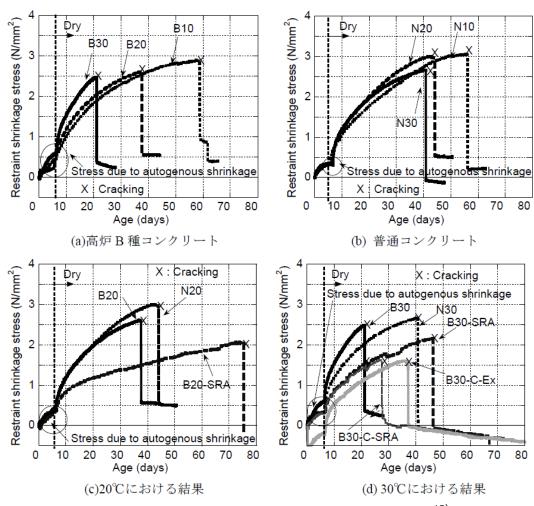


図 2-3-2 収縮拘束応力の経時変化とひび割れ挙動の例 18)

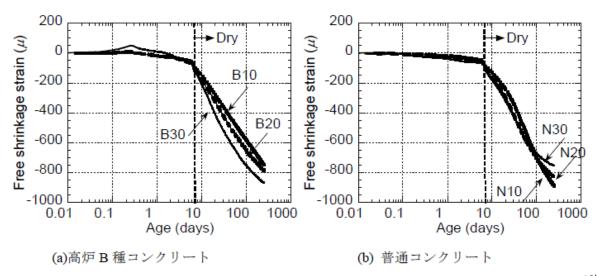


図 2-3-3 高炉セメント B 種相当を用いたコンクリートの収縮ひずみに及ぼす環境温度の影響 $^{18)}$

表 2-3-3 高炉セメント・高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのフレッシュコンクリートの性質

項目	性質				
	L.安				
スランプ	・同じ単位水量の場合,高炉スラグ微粉末を用いないコンクリートよりもスランプが大きく	12)			
	なる. つまり, ワーカビリティーに優れる.				
空気量	・高炉スラグ微粉末を用いない一般のコンクリートに比べて空気量が若干入りにくくなる傾	12)			
	向にある.				
経時変化	・高炉スラグ微粉末を用いない場合に比べてスランプの低下が小さい.	12)			
凝結	・粉末度による差は認められないが,置換率が 55%の場合,BF を用いない一般のコンクリ	12)			
	ートに比べて,凝結時間は 2~3 時間程度遅延する.				
	・高炉スラグ微粉末の比表面積が小さく,置換率が大きいほど凝結が遅くなる.	13)			
ブリーディング	・高炉スラグ微粉末の比表面積が小さく,置換率が大きいほどブリーディング量が多くなる.	13)			
発熱量	・コンクリートの初期の温度上昇速度は置換率の増加に伴って遅くなるが,最終温度上昇量	12)			
	は置換率 60%程度でもベースのセメントと同程度である.				
	・室温 20℃での水和熱は置換率にほぼ比例して低減する傾向があるものの, 断熱状態の発熱	13)			
	環境では一概に傾向を整理できない.				
	・せっこう(石膏)を添加することで水和発熱量の低減に効果がある.	14)			
	・20℃の温度環境下で測定すると,高炉スラグ微粉末の置換率にほぼ比例して低減する.断	15)			
	熱条件下で,セメントの水和熱が蓄積され,高温になる環境下では,置換率と断熱温度上昇				
	量の関係は複雑になり,断熱温度上昇量は置換率が小さい場合は無混入よりも大きくなる.				

表 2-3-4 高炉セメント・高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの硬化コンクリートの性質

		参考
項目		文献
圧縮強度	・圧縮強度は,無混入の一般のコンクリートに比べ,材齢初期では低下するが,材齢の経過ととも	12)
	にその差が小さくなり,長期材齢では無混和のものに比べて上回るようになる.	
強度発現性	・粉末度が大きいほど,初期強度が大きくなる.	12)
	・置換率が増加するに伴い,初期強度は小さくなるが,長期材齢においては,一般のコンクリート	
	を上回る強度が得られる.	
静弾性係数	・圧縮強度と静弾性係数の関係は高炉スラグ微粉末の有無に関らず等しいと考えてよい.	12)
	・RC 規準のヤング係数算定式では,高炉スラグ微粉末の混入時に 0.95 の修正係数を乗ずる.	4)
	・圧縮強度と一定の関係はあるが,温度履歴や乾燥を伴う場合は,その関係が維持できるとは限ら	13)
	ない.	
引張強度	・圧縮強度と引張強度の関係は,高炉スラグ微粉末の有無に関らず等しいと考えてよい.	12)
曲げ・せん断	・圧縮強度と曲げ強度の関係は,高炉スラグ微粉末の有無に関らず等しいと考えてよい.	12)
強度		
中性化	・中性化は, 高炉スラグ微粉末を用いない一般のコンクリートと同程度あるいは多少大きめである.	12)
	・初期養生が不十分であった場合には、中性化速度が速まる傾向である.	16)
	・自然暴露での材齢 30 年の中性化深さは,同一水結合材比で比較すると,高炉セメントを使用し	15)
	たものが屋内外ともに大きい値である. しかし, 同一圧縮強度で比較した場合は, 中性化深さは大	
	差ない値が得られている.	
乾燥収縮・自	・スラグ置換率が 35~55%程度の場合, 乾燥日数が 3 週間程度までの初期段階の乾燥収縮は, 単	12)
己収縮	位結合材料が多いほど, また置換率および粉末度が大きいほど増加する傾向にあるが, それ以降で	
	は,差異が次第に小さくなり,普通セメントを用いた場合と同様になる.	
	・粉末度が大きい場合には,自己収縮が,無混入の場合より大きくなる.	17)
塩化物イオ	・粉末度が大きいものほど,また置換率が大きいほど,塩分の遮蔽性能に優れている.	12)
ン浸透		
凍結融解	・養生を十分に行えば、高炉スラグ微粉末を用いない一般のコンクリートと同等以上の耐凍害性を	12)
	有する.	
	・粉末度が大きいものほど耐凍害性が向上する.	
アルカリシ	・アルカリ骨材反応の抑制に効果がある.	12)
リカ反応		

このように、従来から整理されていた高炉スラグ微粉末の粉末度、使用率、 SO_3 量などの影響に加えて、温度の影響を加味した検討が今後は必要になると想定される。ここで整理した知見はそのほとんどが一般強度領域での性質になり、高炉スラグ微粉末が温度による影響が大きいことを考慮すると、高強度領域ではセメント量が多く、水和反応に伴う発熱量が大きくなることから、環境温度による影響と同様の影響を受けることが想定できる。

青木ら¹⁹⁾ は高炉スラグ微粉末を用いた水結合材比 30%のコンクリートを対象にした実験で、骨材が存在することで圧縮強度・弾性係数が低下することを報告し、藤原ら²⁰⁾ は、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの線膨張係数が高いことに起因して、粗骨材と熱膨張係数の違いによるものと思われる圧縮強度の低下を確認している。また、児玉ら²¹⁾ は、高炉スラグ微粉末を用いた水結合材比 30%のコンクリートを対象に強制的に高温履歴を与えた際の強度低下を検証しており、高温履歴を与えるまでの前置き時間が短いほど、骨材の熱膨張係数や自己収縮に起因すると考えられる損傷の影響が引張強度で顕著にみられることを報告している。

このように、実験室レベルでは高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの高強度領域の強度低下にかかわる現象が報告されてはいるものの、実機製造による実構造体レベルでの検証などの報告例は極めて少ないのが現状である。高強度コンクリートの実績に関しても、表 2-3-5 に示されるように、高炉セメント B 種を使用した高強度コンクリートの件数が少なく、Fc50 まででかつ特殊な用途に限定されている²²⁾

最近では、高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの報告も増えつつあるが、強度発現性を高めるために比表面積を大きくしたり、石こう量を調整して使用率を高めたものや、シリカフュームと組み合わせたものなど、一般的に供給されている高炉セメント B 種の範囲での実績は少ない^{23),24),25)}.

表 2-3-5 設計基準強度とセメントの種類(コンクリート工学工事 1999~2007 より)¹⁹⁾

設計基準強度 (N/mm²)	セメント種類	延べ件数	備考
130~80	N+BS+SF	7	プレミックス品
	L+SF	5	プレミックス品
100	M+SF	1	SF は混和材として使用
	L+SF	19	
80~42	高ビーライト系セメント	7	
	M	3	
60~39	N	20	
50~42	ВВ	3	CFT, 地中梁
42	BB+SF	1	CFT
	合 計	66	

2. 3. 2 フライアッシュを用いたコンクリート

フライアッシュを使用したコンクリートに関しても高炉スラグ微粉末と同様に歴史は古く,フレッシュコンクリートの流動性改善,ポゾラン反応による長期材齢での強度発現の増進,遮塩性や化学抵抗性の向上などの効果を期待して,昭和50年頃までは建築工事に使用する混和材料の代表格として広く利用されていた.しかし,昭和50年代以降は,土木工事に使用するマスコンクリートの温度ひび割れ対策としての利用は継続してあるものの,建築工事には火力発電所施設や原子力発電所施設を除いてほとんど使用されなくなってきた.その理由として,フライアッシュの受入・貯蔵設備を保有するレディーミクストコンクリート工場が限られており,大多数の中小規模の建築工事向けにフライアッシュを適用することが困難なことなどが挙げられる²³⁾.

また、長期材齢の強度増進に寄与するポゾラン反応は、水酸化カルシウムを消費することから、中性 化の進行が早まることが知られ、建築物の寿命が中性化による鉄筋腐食とする耐久設計思想から特に建 築工事において不安視されることが挙げられる.

しかし、東日本大震災後以降、原子力発電の稼働率が低下し、現在では火力発電への依存度が高まり、 火力発電によるエネルギーの供給比率が増加している状況にある。火力発電の副産物であるフライアッ シュの安定的な処理・利用は発電所の安定運転に不可欠な要素であり、低炭素型コンクリート用の資材 としての有効活用が期待されている。

石炭灰の有効利用状況は、約6割がセメント・コンクリート分野であるとされ、さらにその6割がセメント原料としての利用となっている²⁴⁾. コンクリート用混和材料としての利用は、1958年にコンクリート用混和材として、フライアッシュの品質に関するJISA6201が制定されて以降、現在までに多くの研究データが蓄積している.

表 2-3-6 にフライアッシュを用いたコンクリートのフレッシュコンクリートの性質を,表 2-3-7 に,硬化コンクリートの性質をそれぞれ整理して示す.

表 2-3-6 フライアッシュを用いたコンクリートのフレッシュコンクリートの性質

項目	件質	参考		
	江貝			
スランプ	・フロー値比の大きいフライアッシュを用い,置換率が大きいほどスランプは大きく	26)		
	なる			
空気量	・フライアッシュ中の未燃焼カーボンに AE 剤が吸着されるため, 置換率の増加に伴い	26)		
	AE 剤の使用量が増大する.			
経時変化	・フライアッシュと相性の良い減水剤を選定することで,フレッシュ保持性能が確保	28)		
	される (減水剤の選定が特に重要)・			
凝結	・一般のコンクリートより長く,フライアッシュ置換率が大きいほどその傾向が顕著	26)		
	になる.			
ブリーディング	・置換率にほぼ比例して変化する	26)		
	・粒径が小さくなるとブリーディングは減少する			
	・無混入との差はあまり大きくはない			
発熱量	・コンクリートの内部温度履歴は,フライアッシュの置換率が高くなるとともにコン	26)		
	クリート内部の最高温度は低くなり,また,その到達時間は長くなる傾向にある			
	・コンクリートの断熱温度上昇量はフライアッシュ置換率が増大するほど温度上昇速			
	度が緩慢となり,置換率 20%の場合で無混入に比べて低減効果が約 20%ある.			

表 2-3-7 高炉セメント・高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの硬化コンクリートの性質(1/2)

項目		
	性質	文献
圧縮強度	・フライアッシュを用いたコンクリートの一般的な傾向は、無混入のコンクリートに比べて、材齢	26)
	28 日以前では小さく,材齢 91 以後の長期材齢では条件によって同等または大きくなる.	
	・種類によっても傾向は異なり,I種はI種・II種に比べると短期材齢での強度発現が大きく,長	
	期強度の伸びが小さくなる傾向を示す.	
強度発現性	・フライアッシュの粒子が粗いほど,置換率が大きいほど,初期の強度発現性は遅れ,特に低温時	26)
	ではその傾向が顕著になる.	
	・Ⅱ種品の材齢 28 日における強度寄与率は 0.25 以上、材齢 91 日では 0.60 以上	
	・低温環境下では標準環境下に比べて強度低下傾向が認められるが,高温環境下では強度低下傾向	29)
	は認められず, 全般に良好な強度発現を示す.	
静弾性係数	・普通強度から高強度・超高強度コンクリートの範囲まで適用可能なヤング係数推定式として	26)
	NewRC 式が提案され,フライアッシュのヤング係数の補正係数は 1.1 である.	
	・水結合材比 35%の場合では,NewRC 式を若干下回る傾向を示すとの報告もある.	
引張強度	・フライアッシュを用いたコンクリートでは材齢初期の引張強度が小さな傾向となる.	30)
	・フライアッシュの種類(I 種, II 種)、置換率(10,15,20%)及び置換方法(内割、外割)による大きな	
	差はない.	
中性化	・同一水結合材比ではフライアッシュの種類および置換率によらず,フライアッシュを使用したコ	26)
	ンクリートは無混入のコンクリートに比べ中性化速度が大きい.	
	・フライアッシュ無混和のコンクリートと同じ圧縮強度であっても,フライアッシュを使用したコ	
	ンクリートのほうが中性化速度は大きくなる.	
	・同一水ポルトランドセメント比で比較すると同等である.	
	・呼び強度 24N/mm² の場合,無混入のコンクリートに比べてフライアッシュを使用したコンクリ	31)
	ートは 2 割程度中性化深さが深くなったが,呼び強度 30,39N/mm² に高めるとセメント種類の違	
	いの影響が縮小する.	
乾燥収縮・自	・乾燥収縮はフライアッシュ無混入のコンクリートと同等もしくは無混入より小さくなる.	26)
己収縮・収縮	・自己収縮はフライアッシュを使用することで小さくなる.	28)
ひび割れ	・フライアッシュを混入した(20%内割り及び 20%外割り)コンクリートのひび割れ発生時期及びひ	32)
	び割れ幅等のひび割れ性状は普通のコンクリートの性状と同等,またはそれ以上.	
	・フライアッシュを 20%置換することで, 拘束収縮応力が緩和されひび割れの発生が若干遅くなる.	33)
塩化物イオ	・同一水結合材比で比較した場合, フライアッシュの種類および置換率によらず遮塩性が向上する.	26)
ン浸透	・フライアッシュコンクリートの見掛けの拡散係数と水結合材比との関係は、高炉セメントやシリ	28)
	カフュームを使用した場合の推定式を適用しても安全側の評価となる	
	・品質の異なる 3 種類のフライアッシュを普通ポルトランドセメントの 15, 30, 45%代替として	34)
	用いた水結合材比 27, 40, 55%のコンクリートについて, 遮塩性に関してはフライアッシュの品	
ı I	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	i

(次頁に続く)

表 2-3-7 高炉セメント・高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの硬化コンクリートの性質(2/2)

項目		
	江東	文献
凍結融解	・空気量の経時変化の大きい AE 剤を用いた場合ある程度の空気量が確保されていても対凍害性が	26)
	劣る場合がある.AE 剤の使用量が著しく大きくなる場合はフライアッシュ用 AE 剤を使用する.	
	・気泡間隔係赦 300µm 以下であれば,フライアッシュの混和の有無,採取時期,水結合材比によ	35)
	らず耐凍害性は優れる.	
	・フライアッシュを外割り混合した non-AE コンクリートの耐凍害性は大きく劣る傾向にあるが,	36)
	空気の連行により普通コンクリートと同等の耐凍害性が確保できる.	
アルカリシ	・アルカリシリカ反応抑制する方法に採用する場合は、Ⅰ種またはⅡ種の使用で置換率 15%以上と	26)
リカ反応	する	
	・フライアッシュ無混和の場合モルタルバー法で 1 ヶ月経過時 0.1%以上の膨張量を示すものが,	
	フライアッシュを 20%置換した場合,フライアッシュ産地によらず膨張がほとんど生じなくなる.	
	置換率 10%ではフライアッシュの種類によって抑制効果に差がでる.	
	・強度発現性の高い FA は,ASR 膨張量抑制効果に優れる.	37)
	・コンクリートのアルカリシリカ反応の抑制効果において、シリカやアルミナの含有量よりも、フ	38)
	ライアッシュのブレーン値による影響を強く受ける.	
	・再生骨材を用い,フライアッシュの添加の有無による反応性の差異について検討した結果,再生	39)
	骨材コンクリートにおけるフライアッシュによるアルカリシリカ反応の十分な抑制効果を確認.	

2.3.3 産業副産物系混和材を大量置換した低炭素型コンクリート

低炭素化への要求に応えることを主目的とした場合に、低炭素型コンクリートの中でも産業副産物系混和材が大量置換されたものは CO_2 削減効果が大きくなる。しかし、2.3.1、2.3.2 項で整理したように高炉スラグ微粉末やフライアッシュには、それぞれメリットとデメリットがあり、それは置換率が高くなるほど顕著になる。そのため、強度発現や耐久性確保の観点から、高置換は不利になる場合が多く従来から実用化に向けた取組みはあまり行われてこなかった。しかしながら、近年では、低炭素化への要望に応えるべく高置換型の低炭素型コンクリートを主に地下躯体などのデメリットが問題となりづらい箇所に限定して、実用化していくための様々な研究が進められている。また、石こうの最適添加や、反応刺激剤といった新たな手法によりデメリットを極力減らす試みも進められている。

小林ら ⁴⁰⁾ は、表 2-3-8 に示すようにセメント (C)、高炉スラグ微粉末 (BS)、フライアッシュ (FA)、シリカフューム (SF) を 2~4 種類を組合せることで、各種結合材の組合せおよび置換率による影響を検討している。 圧縮強度は、図 2-3-4 のように BS と FA は結合材の組合せや水結合材比にかかわらず、その置換率の増加にともなって標準養生強度は低下する傾向にあることが示されている。 中性化に対しては、図 2-3-5 のように BS と FA ともに置換率の増加にともなって中性化速度係数は増加する傾向にあることが示されている。 しかし、それらの結果を複合的に考察した結果では、図 2-3-6 に示すように中性化速度係数と強度の間に高い相関が認められることを根拠に、水結合材比を低減させ、緻密な組織を形成することで、中性化の進行を抑制できることが示唆されている。

表 2-3-8 結合材の混合割合 40)

No	- 14八	ý Ž	と合割合(%))	
No.	成分	C	BS	FA	SF
1	1	100	0	0	0
2		50	50	0	0
3	9	25	75	0	0
4	2	15	85	0	0
5		10	90	0	0
6	3	0.5	65	10	0
7		25	55	20	0
8			75	10	0
9		15	65	20	0
10			55	30	0
11	4	1.5	65	17. 5	2. 5
12	4	15	65	15	5

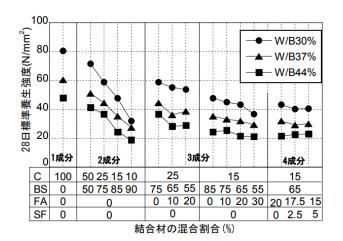


図 2-3-4 結合材の混合割合と 28 日標準養生強度の関係 40)

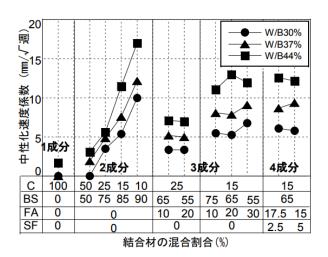


図 2-3-5 結合材の混合割合と中性化速度係数の関係 40)

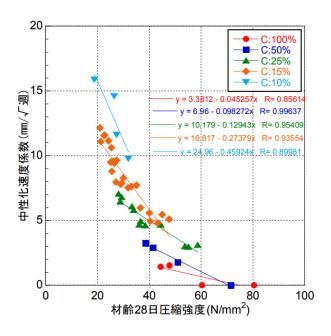


図 2-3-6 結合材の混合割合と中性化速度係数の関係 40)

新エネルギー・産業技術総合開発機構による省エネルギー革新技術開発事業において、建設会社、セメントメーカー、大学をグループとした共同研究により、エネルギー・CO2 ミニマム(ECM) セメントと称される高炉スラグ微粉末を高含有する結合材を用いた低炭素型コンクリートが開発され、多くの実験データの蓄積ならびに実用化に向けた品質管理技術などが整理され、実用化がはじまっている 41).

高炉スラグ微粉末を 60~70%混合することで、セメント製造に要するエネルギー消費量を 60%以上削減されながら、施工性や品質上の課題を ECM セメントの成分構成と粒度構成の研究などにより解決したとされ、主に基礎構造物(地盤改良体、杭)、躯体構造物(建築地下躯体、土木構造物)を対象に普及を目指している.

JIS R 5211 の高炉セメント C 種の範囲内で, カルシウム系添加材として石こうを最適量添加することで, 図 2-3-7, 図 2-3-8 に示すように初期強度性状や収縮性能の改善効果を確認している ⁴²⁾.

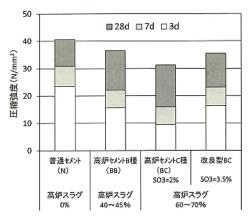


図 2-3-7 圧縮強度特性の一例 42)

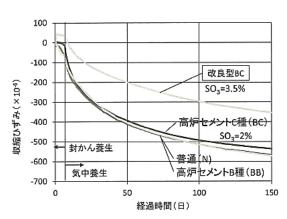


図 2-3-8 自由収縮ひずみ測定結果の一例 42)

さらに閑田ら⁴³⁾ は、マスコンクリート部材に適用することを想定した温度ひび割れ抵抗性について明らかにするため、実機製造したコンクリートを対象に、発熱特性、温度履歴、温度応力の発現について実験と解析により検討し、温度ひび割れ抵抗性を定量的に示している.

表 2-3-9 に示す調合を対象として、1×1×1mの実大模擬部材を製作し、中心位置におけるコンクリート温度の経時変化を測定している(図 2-3-9). その結果、改良 BC(高炉セメント C 種相当)を用いたコンクリートは、一般品の BB を使用したコンクリートよりも夏期で最高温度、温度上昇量ともに 10℃以上低く、中庸熱ポルトランドセメントと同程度の温度履歴となっていることが示されている.また、実大模擬部材の中心部のひずみデータをもとに導出した、自己収縮を含む見かけの線膨張係数を図 2-3-10 に示すが、高炉スラグ微粉末の置換率が高くなるほど線膨張係数が大きくなる傾向が報告される中で、見かけの線膨張係数は BB よりも BC のほうが低いことから、自己収縮が抑制されていることが一因であると述べている.

表 2-3-9 コンクリートの調合 ⁴³⁾

	W/C	/C s/a		単	単位量(kg/m³)			混和剤
記号	(%)	(%)	水	セ火ン		細骨	細骨	粗骨	(対セメント質量比)
				クリンカ	BFS	材1	材2	材	1. 貝里比/
S-E33	42	44.0	178	136	288	366	366	962	0.90
S-BB33	43.5	42.6	186	248	180	281	421	974	0.80
S-M33	46.5	45.4	176	379	ı	394	394	960	1.20
F-E40	38	39.2	185	156	331	467	155	996	0.65
F-E33	45	43.1	175	124	265	548	184	996	0.70
F-E27	55	46.4	166	97	205	626	208	996	0.75
W-E33	42	44.8	177	135	287	374	374	948	1.00

*1 BB, BCの場合は、クリンカー起源分と高炉スラグ分(BFS)とに分けて表記

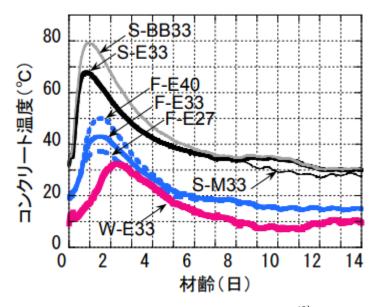


図 2-3-9 実大模擬部材の温度履歴 43)

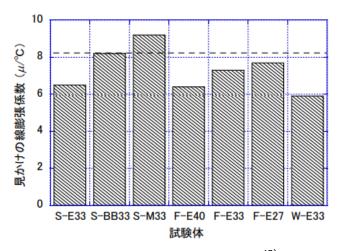


図 2-3-10 見かけの線膨張係数 43)

このような報告から、高炉スラグ微粉末を大量置換した場合でも、高強度領域では十分な中性化抵抗性が期待できること、一般品の高炉セメント B 種では発熱特性や自己収縮に特に注意しなければならないことが分かる.

また、高炉スラグ微粉末を大量置換することでフレッシュコンクリートの経時変化が急激に低下する 現象について、高炉スラグ高含有セメント用に適した化学混和剤が開発され、流動性の保持性能が改善 されている⁴⁴⁾. 高強度領域では、結合材量が多いことから、フレッシュコンクリートの経時変化には特 に留意しなければならないが、このような高炉スラグ微粉末の高含有に対応できる化学混和剤を用いる ことで、そのリスクは低減されてきていると思われる.

2. 3. 4 高炉スラグ微粉末とフライアッシュを使用した3成分系低炭素型コンクリート

2.3.1, 2.3.2 項に整理したように、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混和材としてそれぞれ使用した場合の研究は数多く行われているが、近年、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した3成分系結合材量による低炭素型コンクリートに関する研究もいくつか報告されている.

産学官共同研究報告書としてまとめられている「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」 (温度ひび割れ・乾燥収縮ひび割れ低減型コンクリート) 配合・製造および施工指針(案) 45) では,高 炉セメント B 種を使用したコンクリート部材で、温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れの発生事例が多数報告されるようになっていることを問題視したうえで,高炉セメント B 種にフライアッシュを混和材として混合することで,温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れの発生確率を低減できることが示されている.

図 2-3-11 に温度変化,図 2-3-12 に乾燥収縮ひずみの経時変化を示すが、いずれも高炉セメントB種単体のものよりも抑制効果があることが示されている。

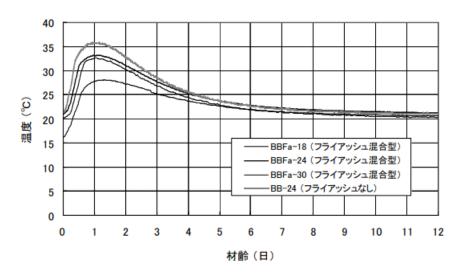


図 2-3-11 フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの温度変化 ⁴⁵⁾

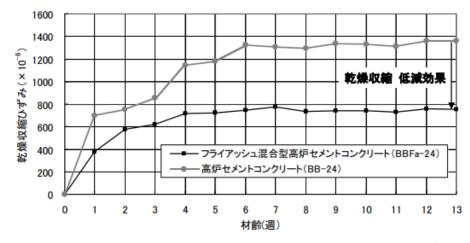


図 2-3-12 フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリートの乾燥収縮ひずみ計時変化 ⁴⁵⁾

松家ら⁴⁶⁾ は,「力学・耐久性能」と「ローカーボン」との最適化を目指して,比較的少ない置換率の高炉スラグ微粉末とフライアッシュを組合せたときの性状を検討している。その結果,普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末およびをフライアッシュそれぞれ20%置換した三成分系セメントを用いたコンクリートが力学性能,ひび割れ抵抗性能,耐久性能および環境負荷低減性能の観点から優れることを報告している。

さらに、松家らの研究から発展した齋藤ら ⁴⁷⁾ の報告では、ポルトランドセメント: フライアッシュ: 高炉スラグ微粉末の質量比が 60:20:20 の比率のコンクリート (ローカーボンハイパフォーマンスコンクリート (LHC)) が、レディーミクストコンクリート工場で製造するには、セメントサイロに加えて混和材サイロが2基必要となり、製造側の貯蔵設備によっては製造が困難となる場合があることを課題とし、それを解決する方法として高炉スラグ微粉末の代わりに一般的なレディーミクストコンクリート工場で常時保有している高炉セメント B 種を用いて製造する方法について提案するとともに、その優れた温度ひび割れ抑制効果について図2-3-13に示す解析結果から明らかにしている.

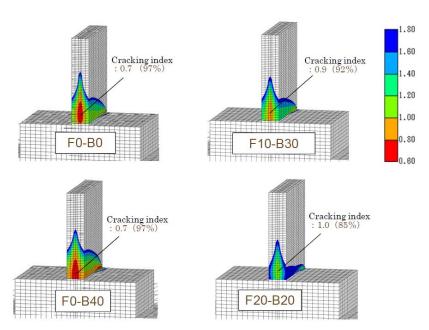


図 2-3-13 最小ひび割れ指数 (温度応力+自己収縮) に及ぼす置換率の影響 47)

また、齋藤ら ⁴⁸⁾ の報告では、W/B=30%の低水結合材比における自己収縮についての実験を行っており、同一の高炉スラグ微粉末では、フライアッシュの置換率の増加に伴い、自己収縮ひずみが減少する傾向が示されている。

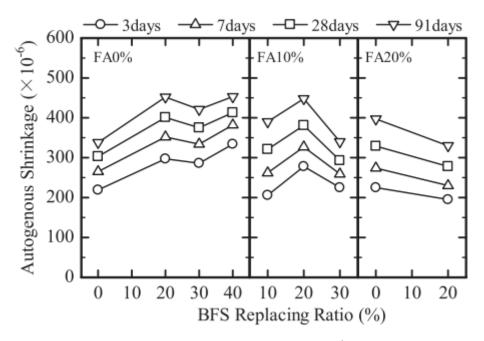


図 2-3-14 自己収縮測定結果 48)

黒田ら⁴⁹⁾ は、上記のコンセプトと同様に、既存の材料を組み合わせ、生コン工場で混合する方針のもと、我が国で比較的入手しやすい結合材を2種類まで使用するとした場合を想定して、高炉セメントB種にフライアッシュを20%混合使用したコンクリートの品質や温度ひび割れ抵抗性についての検討を行っている。その結果、同じ水結合材比において、高炉セメントB種にフライアッシュを20%混合使用したコンクリートの圧縮強度は、中庸熱ポルトランドセメントを用いた調合に対して低く、長期的にも差を生じたこと、マスコンクリートのひび割れ解析を実施した結果、温度ひびわれへの抵抗性は概ね同等であることを報告している。

以上より,高炉セメント B 種におけるデメリットの一つである収縮ひび割れ抵抗性は,フライアッシュを組み合わせることで改善される傾向にあることが分かる.また,高強度領域においても,自己収集ひずみの抑制効果から同様に収縮ひび割れのリスクは低減されるものと思われる.但し,結合材に使用される粉体の種類が多くなることで,レディーミクストコンクリート工場への設備上の負担が大きくなることに留意しなければならない.

2. 4 建築物の環境影響評価手法に関する調査

2. 4. 1 ライフサイクルアセスメント (LCA) 手法による評価

ライフサイクルアセスメント(LCA: Life Cycle Assessment)とは、製品の原材料の調達から製造、使用および廃棄に至るライフサイクル全体を通しての環境側面および潜在的環境影響を評価するものである。LCAを通じて、各段階の資源やエネルギー投入量と、様々な排出物の量を定量的に把握し、環境改善などに向けた意思決定を支援することが大きな目的の一つといえる。

LCA が普及し始めたのは 1990 年代後半とされ, 1997 年 6 月にようやく ISO14000 シリーズ (環境マネジメント規格群) の一部として ISO14040 (LCA の原則および枠組み) が国際規格となった. わが国では, ISO14040 が和訳され 1997 年 11 月に JIS Q 14040 となった. このように規格が整備されるとともに, LCA は環境影響の評価に科学的・客観的な根拠を与えることができることから, 活用の範囲は広がっており, 各分野における LCA 手法の国際的標準化が進められている.

ISO14040 で整理されている LCA の枠組みと概念は図 2-4-1 に示すように,(1)目的および調査範囲の設定,(2)インベントリ分析,(3)影響評価,(4)結果の解釈から構成されることが規定されている.

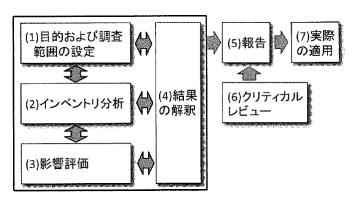


図 2-4-1 LCA の概念図

(1) 目的および調査範囲の設定

LCA 実施の目的,調査範囲の設定では,調査の実施理由・結果の利用方法・結果の報告相手などを明確にすることとされている。LCA の目的が、例えばコンクリートの製造を対象とするのか、あくまで建築物の部材の一つとして建築物全体を評価するのかによって分析レベルは異なることを意味しており、それに応じた調査範囲の設定が求められる。

(2) インベントリ分析

インベントリ分析とは、「対象とする製品システムに対する、ライフサイクル全体を通しての入力および出力のまとめ、ならびに定量化を行う LCA の構成段階」と定義されている。すなわち、ライフサイク

ル各段階で、インプット・アウトプットされる全ての原材料とエネルギーおよび廃棄物の量を一覧表に 整理し、定量化する作業になる.

(3) 影響評価

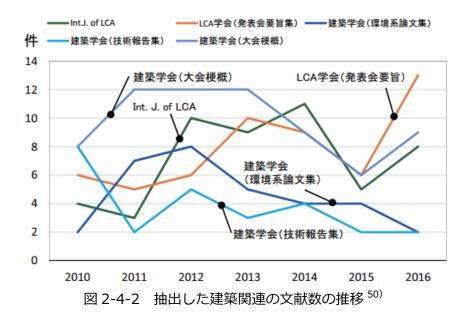
影響評価は、インベントリ分析で得られた環境影響物質を地球温暖化、オゾン層破壊、酸性化などの環境影響に分類し、各分類内を特性係数で集計する. さらに、人間お健康の損失、生態系の衰退、資源の枯渇などの被害を、自然科学的な知見を利用して得られるダメージ関数を設定して推計する.

(4) 結果の解釈

結果の解釈は、影響評価の結果を基に、検証対象としている建築の機能を損なうことなく、一定の環境負荷または、環境影響の結果を解釈し、改善策に結びつけるためのプロセスである。

このように、LCA の結果、データ、方法、前提条件および限界には透明性があり、一定の根拠に基づき体系化されているものである。しかし、建築分野においては、LCA の活用は決して十分とはいえないのが現状といえる。普及を妨げる大きな要素として、建築物の単品受注生産式の特殊性が挙げられ、影響範囲があまりに膨大なことに加えて評価対象が多様化するため統一的な評価手法を設定することが極めて困難であることと推察できる。

建築分野の LCA の一層の活用のための課題を明らかにするためとして小林 $^{50)}$ によって実施された国内外の文献調査結果によると、該当する文献数自体が少ないことが伺え、建築全体を評価したものは更に少ないことがわかる(図 $^{2-4-2}$ 、図 $^{2-4-3}$)。また、国内外の LCA に関する研究の大きな違いとして、海外の LCA を母体とする論文では、多領域(マルチクライテリア)で評価されることが多いのに対して、国内の文献で評価されている影響領域のほとんどが $^{2-4-4}$ に図 $^{2-4-4}$ に図 $^{2-4-4}$ に以上の一名で記載して、第一名で記載して、第一名で記載して、第一名の文献で評価されている影響領域のほとんどが $^{2-4-4}$ に以上の一名で記載して、第一名で記載して、第一名で記載して、第一名で記載して、第一名で記載して、第一名で記載して、第一名で記載して、第一名で記載して、第一名で記載して、第一名で記載して、第一名の主意を表現る。



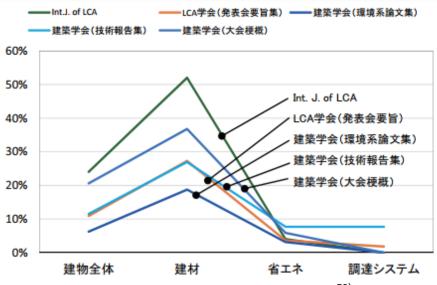


図 2-4-3 評価の視点ごとに見た文献数 50)

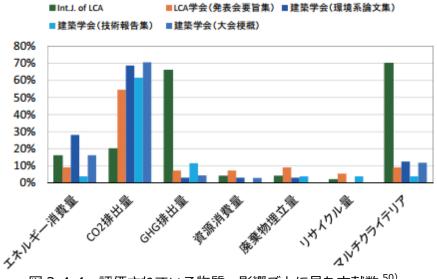


図 2-4-4 評価されている物質・影響ごとに見た文献数 $^{50)}$

2. 4. 2 環境性能評価システム

前項で示した LCA 手法とは別に、各国における環境性能評価システムの開発が進められており、実際 に制度化されているものについて、以下にその概要を示す.

(1) CASBEE⁵¹⁾

CASBEE(Comprehensive Assessment System for Built Environm ent Efficiency)は建築環境総合性能評価システムの略称で、2001年より国土交通省の支援のもとに産官学連携で開発されてきた評価手法である。CASBEEは、図 2-4-5 に示すように、建築物の環境品質(Q)の評価点を環境負荷(L)の評価点で除すことで定義する環境効率 BEE(Q/L)に基づいて「S」「A」「B+」「B-」「C」の 5 段階で格付けする手法である。

2004年における名古屋市,大阪市での導入を皮切りとして,2017年5月時点で24の都市(都道府県および市町村)において導入され,主に述床面積2000m3以上の新築建築物を対象にCASBEE届出を義務付けている.

2011年から、CASBEE-新築ツールに LCA 手法のうち LCCO2 に限定した低炭素評価が実装されており、標準計算と個別計算を選択できる仕様になっている。図 2-4-6 に標準計算シートの建設時および修繕・更新・解体段階にかかわる項目を示すが、実際に入力する欄は水色のセルであり、それ以外のセルは構造形式・用途等に応じて統計値を用いて自動計算される。すなわち、評価結果に反映される項目としては、高炉セメントの躯体での利用率と既存躯体の再利用率のみである。個別評価では、すべてのセルを任意に入力して算定できる仕様になっており、資材量ならびに環境負荷原単位を個別に入力することできるが、具体的にどのような根拠、方法で入力すべきかに関する情報は提示されておらず、ほとんどが標準計算シートを用いた届出なのが現状といえ、個別評価には多くの課題が残る。

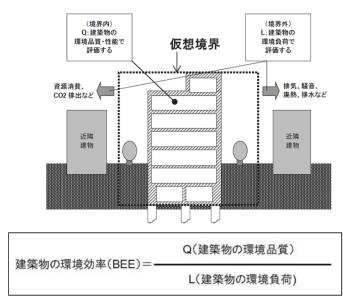


図 2-4-5 環境効率に基づく CASBEE 評価の概念図 51)

■LCCO₂算定条件シート(標準計算)

	[定条件シート(標準語	I A /	■建物名称	00ビル
				E-BD_NC_2014(v.
	項目	参照値(参照建物)	評価対象	備考
建物	建物用途	事務所.	事務所,	
概要	建物規模	3,000 m²	3,000 m²	
	構造種別	RC造	RC造	
イフサイクル 設定	想定耐用年数	事務所部分60年,	事務所部分60年,	
	CO₂排出量	13.23	13.23	kg-CO ₂ /年㎡
	エンボディドCO₂の 算定方法	日本建築学会による2005年産業連関表 分析による日本の平均値	左記からの、リサイクル建材の採用による 削減量を推定して算定	
	CO₂排出量原単位の 出典	日本建築学会による2005年産業連関表 分析による分析結果	同左	
	パウンダリー	国内消費支出分	同左	
	代表的な資材量			
	普通コンクリート	0.77	0.77	m³/m²
	高炉セメントコンクリート	0.00	0.00	m ³ /mi
	鉄 骨	0.04	0.04	t/m²
建設	鉄筋	0.10	0.10	t/m²
	木 材	0.01	0.01	t/m²
		00	"	kg/m²
	代表的な資材の環境負荷		-	
	普通コンクリート	266.71	"	kg-CO ₂ /m ³
段階	高炉セメントコンクリート	216.57	"	kg-CO ₂ /m ³
	鉄骨	1.28	"	kg-CO ₂ /kg
	鉄 筋	0.51	"	kg-CO ₂ /kg
	型枠	4.75	"	kg-CO ₂ /m²
	0 0	00	"	kg-CO ₂ /kg
	主要なリサイクル建材と利			ng-CO2/ ng
	主要なりりイブル遅州と利 高炉セメント (躯体での利用率)	0%	0%	
	既存躯体の再利用 (躯体での利用率)	0%	0%	
	電炉鋼材(鉄筋)	0%	0%	
	電炉鋼材(鋼材)	0%	0%	
	CO₂排出量	16.46	16.46	kg-CO ₂ /年㎡
繕・更新・	更新周期(年)			
解体段階	外装	25年	25年	
	内装	18年	18年	
	設備	15年	15年	
	平均修繕率(%/年)			
	外装	1%	1%	
	内装	1%	1%	
	設備	2%	2%	
	解体段階のCO₂排出量の	解体廃棄物量として、2000kg/㎡を仮定 して、30kmの道路運送分を評価	同左	

構造躯体における高炉セメントの 利用率と、当該建築物が建設さ れる前に存在していた建築物の 躯体を再利用している場合の利 用率を入力。

図 2-4-6 CASBEE 標準計算シート ⁵¹⁾

(2) BREEAM⁵²⁾

BREEAM(Building Research Establishment Environmental Assessment Method)は 1990 年にイギリス建築研究所が主導して開発した建築物の環境性能評価手法であり、ヨーロッパでのグリーンビルディングの標準的な評価に使われている.

新築, 既存のいずれの建築物にも適用でき, 最終評価は, マネジメント, 健康, 快適性, エネルギー, 交通, 水, 廃棄物, 材料等の9のカテゴリごとにポイントを算出し, それらに重み係数を掛けた加重集計を行う手法である. CASBEE と同様に最終的には5段階の格付けを行う.

(3) LEED⁵³⁾

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) は、米国グリーンビルディング協会の所管する建築物の環境性能の格付け・認証制度として 1996 年に開発された。新築、既存のいずれの建築物にも適用でき、「建築設計・施工」「運用・維持管理」「住宅」などのツールが提供されている。

CASBEE や BREEAM と同様の環境総合評価システムに位置づけられるが、CASBEE や BREEAM はその土地の独特の文化や気候、基準に配慮した設計になっているため、国際間ではほとんど使用されないのに対して、LEED はグローバルスタンダードとしての評価が高まっている。

各国の https://www.usgbc.org/advocacy/country-market-brief で確認することができ、日本においても 2013 年に一般社団法人グリーンビルディングジャパンが設立され、LEED 認証の申請、取得件数が増えつつある。

これらの(1)~(3)のような取り組みは、グリーンビルディング認証制度と呼ばれ、イメージアップによる売り上げの上昇及び人材の確保、省エネ・省水・メンテナンスの削減による運用費の低減、高性能空調による従業員の生産性の向上などに繋がることが期待され、建設関連分野においても世界的に普及が進んでいる。イギリスについては、自治体が BREEAM 認証を求める場合があり、さらに米国では、LEED 認証は国と自治体の補助金又は優遇税制の取得とつながる等の政府主導のインセンティブが与えられている。

但し、共通して求められることとして、本研究のような低炭素型コンクリートの適用効果を認証制度 に組み込む場合には、専門的な LCA 手法に基づく根拠データの開示が必要になる.

2. 4. 3 環境ラベル

環境ラベルは、製品やサービスの環境側面について、製品や包装ラベル、製品説明書、技術報告、広告、広報などに書かれた文言、シンボル又は図形・図表を通じて購入者に伝達するものと定義されており、その種類も多種多様になっている、環境省では、環境表示方法に関する統一的な考え方やルールを示すため、環境表示に関する様々な問題点や課題をとりまとめ、国際的な動向を考慮しながら検討を重ね平成20年1月に「環境表示ガイドライン〜消費者にわかりやすい適切な環境情報提供のあり方〜」を策定・公表し、さらに平成25年3月に改定版「環境表示ガイドライン」を公表している540.

環境ラベルは、ISO14000s において、表 2-4-1 に示すようにタイプ I ~タイプ II に分類して規格が制定されており、タイプ I は基準合格の証明をラベルで示すもので、日本ではエコマークなどが該当する。タイプ II は、企業の行った環境情報を自己主張(情報発信)するものである。タイプ II は製品環境情報を定量的な情報で開示するものであり、後述するカーボンフットプリントがタイプ III ラベルとして世界的に普及してきている(図 2-4-7 中赤枠)。

表 2-4-1 ISO の環境ラベルに関する規格 ⁵⁴⁾ Oにおける名称及び該当規格 特徴 内容

ISOにおける名称及び該当規格	特徴	内容
タイプI (ISO14024) "第三者認証"	第三者認証による環境 ラベル	・ 第三者実施機関によって運営 ・ 製品分類と判定基準を実施機 関が決める ・ 事業者の申請に応じて審査し て、マーク使用を認可
タイプII (ISO14021) "自己宣言"	事業者の自己宣言による環境主張	・ 製品における環境改善を市場 に対して主張する ・ 製品やサービスの宣伝広告に も適用される ・ 第三者による判断は入らない
タイプIII(ISO14025) "環境情報表示"	製品の環境負荷の定量 的データの表示	・ 合格・不合格の判断はしない・ 定量的データのみ表示・ 判断は購買者に任される

<国及び第三者機関の取組による環境ラベル>



図 2-4-7 環境ラベルの例 54)

2. 4. 4 カーボンフットプリント (CFP)

カーボンフットプリント(Carbon Footprint of Products)(以下,CFP)は,図 2-4-8 に示すように商品やサービスの原材料調達から廃棄・リサイクルに至るまでのライフサイクル全体を通して排出される温室効果ガスの排出量を CO_2 に換算して、商品やサービスに分かりやすく表示する仕組みである $^{55)}$. CFP には,LCA 手法が活用され、地球温暖化に限定した環境負荷が定量的に算定された結果を表示することで「見える化」される.CFP 算定の目的は,事業者と消費者の間で CO_2 排出量削減行動に関する「気づき」を共有し,「見える化」された情報を用いて,事業者がサプライチェーンを構成する企業間で協力して更なる CO_2 排出量削減を推進することとされている.また,「見える化」された情報を用いて,消費者がより低炭素な消費生活へ自ら変革していくことを目指すものである. さらに,算定事業者においても,「見える化」された情報が蓄積されることにより,どの段階で負荷が大きいかなどの分析が可能になり,低炭素化に関する技術開発の根拠情報になることが期待されている.

CFP 事業はイギリス, フランス, ドイツなどの欧州が先行して普及が進んだが, 近年では, 韓国, 台湾などでも事業が行われている. 日本における CFP 事業は, 2012 年 3 月に経済産業省等を中心とした 3 年間の試行事業を終了し, 民間へ移行された. 2017 年時点では, 一般社団法人産業環境管理協会が運営する JEMAI 環境ラベルプログラム内に CFP 事業としての基準が定められ, CFP 算定結果を公開するための CFP 宣言認定にあたっては同基準に準拠する必要がある.



図 2-4-8 CFP 概念図 55)

2017 年時点での CFP 宣言認定製品は、1469 件であるが、図 2-4-9 に示すとおり、建築分野に関係するものとしては合板、断熱材、家具といった建材が中心で、建築物を対象とした事例はほとんどない。しかしながら、CFP の概念は、図 2-4-10 に示すように、算定対象のライフサイクルを各段階に区別したうえでそれぞれの CO2 排出量を試算し、それらの試算結果をトータルすることでライフサイクル全体の CO2 排出量を評価するものである。また、その仕組みから第三者機関による LCA 手法に基づいた算定結果の検証が行われることで、CFP 認証を取得していることが LCA 手法に基づく公平な算定結果を表すことを意味する。

このような特性を考慮すると、建築物を一つの製品と捉えることで CFP 認証制度に準拠した CO_2 排出量評価が実施できるものと判断され、本研究において、第 5 章以降において、国内初めてとなる建築物を対象とした CFP 認証制度の活用について検討することとした.

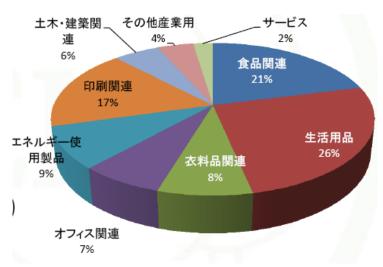


図 2-4-9 分野別 CFP 宣言認定数(2017 年 4 月)⁵⁵⁾

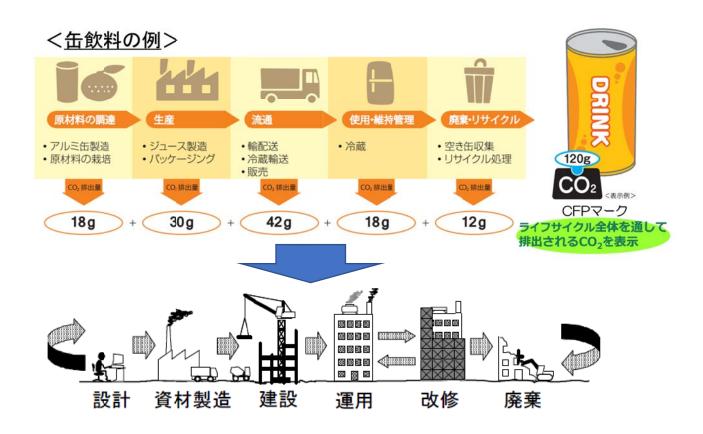


図 2-4-10 CFP 算定のイメージと建築物のライフサイクル図(出典 55), 56) を参考に作図

2.5 まとめ

本章では、3章以降の検討に先立ち、混合セメントや高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混和材料として使用した場合の低炭素型コンクリートに関連する規準・規格・法令における取扱いに関する基本的な考え方や留意点などについて整理を行い、一般強度域においては JIS や JASS5 において建築物に適用可能な基準・規格が整備されていることを確認した。品確法の劣化等級 3を取得する場合には、水セメント比の算定において、混合セメントは混和材部分の一部、もしくは全てを除外して計算しなければならず、地上躯体への適用においては、住宅であるか否かに問わず、劣化等級 3を取得できるかが耐久性上のひとつの判断基準となり得る。

高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを使用したコンクリートについては、古くから多くの知見が蓄積されており、それらの既往の文献を調査し、それぞれ特徴を整理した。さらに、近年行われている産業副産物系混和材を大量置換したコンクリートの特徴や、複合的に用いた場合の特長について調査した。その結果、低炭素型コンクリートに共通する特徴としては、産業副産物系混和材の置換率が高くなるほど、CO2排出量削減効果が大きくなる一方で、初期強度の発現や中性化抵抗性が劣るため、それらの影響を大きく受け易い建築物への適用にあたっては、高置換型の低炭素型コンクリートの適用は地下躯体に限定するなど、適材適所の使用が求められる。そうした適材適所に活用にあたって、高強度領域の低炭素型コンクリートを地上躯体に使用していくことが、建築物への低炭素型コンクリートの適用性拡大に重要であると思われるが、高強度領域の知見は少なく、特に実適用に必要な調合算定式を設定するための部材強度結果や実製造などのデータがほとんどないのが現状である。

また高強度領域においては、緻密な組織が形成されることから、低炭素型コンクリートのデメリットである中性化抵抗性が改善されること、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを組み合わせた3成分系のコンクリートでは、高炉スラグ微粉末単体使用に比べて、温度ひび割れ、収縮ひび割れなどのリスクを低減できる可能性があることを抽出した.

建築物の環境影響評価手法に関する調査では、LCA を中心とした動向や日本での建築環境性能評価システムの導入状況などを整理した。そのうえで、低炭素型コンクリートなどの低炭素化に寄与できる要素技術の削減効果を建築物へ適用した場合の評価手法に関する統一的な手法は確立されていないことが課題として抽出された。

そうした中で、定量的な評価が可能なタイプⅢ環境ラベルとして、カーボンフットプリントに着目し、 建築物のような複雑化しやすい評価においても ISO に準拠した第三者検証で透明性・信頼性を確保でき る可能性があることを示し、国内初めてとなる建築物を対象とした CFP 認証制度の活用について検討へ と繋げた。

- 第 2 章の参考文献 -

- 1) 経経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課:セメント産業における省エネ製造プロセスの普及拡大方 策に関する調査-混合セメントの普及拡大方策に関する検討-報告書,平成20年度経済産業省委託事業, 平成28年3月
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所(監修;国土交通省住宅局建築指導課): 建築物の構造関係技術基準 解説書 2015 年版, 2015 年 6 月
- 3) 前田悦孝: 高炉スラグ微粉末の特性を活かした高炉セメント関連製品,新日鉄住金技報第399号, pp.115-120, 2014
- 4) 日本建築学会: フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説, 2007
- 5) 鐵鋼スラグ協会 HP: 高炉セメント B 種の特別評価方法 http://www.slg.jp/activity/special.html
- 6) 平成 2 7年度建築基準整備促進事業: 「M1 混合セメント等を使用したコンクリートの水セメント比の評価方法に関する検討」 http://www.mlit.go.jp/common/001129584.pdf
- 7) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2015
- 8) 国土交通省大臣官房官庁営繕部:公共建築工事標準仕様書(建築工事編)平成28年版
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書 [施工編], 2012
- 10) 鐵鋼スラグ協会: 高炉セメント百年史, 2010年
- 11) 日本建築学会: 高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針(案)・同解説, 2017.9
- 12) 日本材料学会: コンクリート混和材料ハンドブック, 2004.4
- 13) 伊代田岳史:高炉スラグ微粉末を大量置換したコンクリート, コンクリート工学, Vol.52, No.5, pp.409-414, 2014
- 14) 石川陽一, 鯉渕清, 村上武衡: 高炉スラグ微粉末のコンクリート用混和材としての適用研究 : その 2 水和熱と断熱温度上昇, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A 分冊, pp.1003-1004, 1987
- 15) 依田彰彦: 技術フォーラム資源の有効利用とコンクリート 第5回 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート, コンクリート工学, Vol.34, No.4, pp.72-82, 1996.4
- 16) 檀康弘: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの耐久性能に及ぼす初期養生の影響に関する研究, 九州大学学位論文, 2011.1
- 17) 日本コンクリート工学協会: コンクリート技術の要点'07, 2007.9
- 18) 閑田徹志,百瀬晴基,依田和久,今本啓一,小川亜希子:高炉セメントB種コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に及ぼす各種要因の影響およびその向上対策に関する実験検討,日本建築学会構造系論文集79(695),9-18,2014
- 19) 青木千里, 細田暁, 藤原浩一: 高温履歴を受けた高炉スラグ微粉末含有コンクリートの圧縮強度・ 弾性係数, コンクリート工学年次論文集, Vol, 28, No. 1, pp.161-166, 2006

- 20) 藤原浩一,細田暁,相澤健太 : 高温履歴を受けた高炉スラグ微粉末含有コンクリートの引張性状, コンクリート工学年次論文集 , Vo129, No . 2, pp. 169-174, 2007
- 21) 児玉 章裕 , 細田 暁 , Ha Ngoc Son , 小野 敦子: 高温履歴を受けた低水結合材比の高炉スラグ微粉 末含有コンクリートの圧縮・引張性状(強度・力学的性質), コンクリート工学年次論文集 30(1), 363-368, 2008
- 22) 日本建築学会:高強度コンクリートの技術の現状,2009
- 23) 日本建築学会: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート技術の現状, 1992
- 24)依田和久,笠井浩,全振煥,淺岡茂:環境配慮型 CFT 充填コンクリートの開発: その 2. 圧縮強度 と強度補正値,日本建築学会学術講演梗概集 2012(材料施工),319-320,2012-09-12
- 25) 小林利充 , 溝渕麻子 , 並木憲司 , 一瀬賢一:混和材を高含有したコンクリートの基礎的性状 : その 1322
- 3 成分系の構造体コンクリート強度, 日本建築学会学術講演梗概集 2015(材料施工), 559-560, 2015-09-04
- 26) 日本建築学会: フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解, 2007
- 27) 矢島典明:最近のフライアッシュ事情について,コンクリート工学, Vol.52, No.5, pp.393-398, 2014.5
- 28) 土木学会: コンクリートライブラリー132 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(2009)
- 29) 本田悟: フライアッシュを大量に使用したコンクリートの初期強度発現性, , コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No.1 pp.172-177, 2014
- 30) 古賀誠: フライアッシュの置換率を変えたコンクリートの ASR 抑制効果及び硬化特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No.1 pp.941-946, 2010
- 31) 山本武志:石炭火力産微粒子(フライアッシュ)の利用拡大に向けて,コンクリート工学 Vol.52 No5 pp468~471
- 32) 中川隆夫: フライアッシュを用いたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No.1 pp.483-488, 2004
- 33) 蒋海燕: フライアッシュがモルタル・コンクリートの乾燥収縮ひび割れ特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No.1 pp.205-210, 2013
- 34) 和田真平: フライアッシュコンクリートの中性化,水密性および遮塩性に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 20, No.2 pp.121-126, 1998
- 35) 長瀧重義: フライアッシュコンクリートの空気連行性と耐凍害性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 9, No.1 pp.199-204, 1987
- 36) 藤原佑美: フライアッシュを用いたコンクリートの耐凍害性と自己修復効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No.1 pp.873-878, 2008
- 37) 山本武志: フライアッシュのポゾラン反応性とアルカリシリカ反応抑制効果に関する研究, コンクリ

- ート工学年次論文集, Vol. 22, No.2 pp.61-66, 2000
- 38) 高橋和之: フライアッシュを用いたコンクリートのアルカリシリカ反応抑制, 中性化および乾燥収縮 ひずみに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No.1 pp.965-970, 2011
- 39) 溝口信夫: 再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応に対するフライアッシュによる抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No.1 pp.1553-1558, 2011
- 40) 小林利充, 近松竜一, 溝渕麻子, 一瀬賢一: 低炭素型のコンクリート 「クリーンクリート TM」の開発, 大林組技術研究所報, No.75, pp.1-8, 2011
- 41) 竹中工務店プレスリリース http://www.takenaka.co.jp/news/2015/06/01/ 2015 年 6 月 3 日
- 42) 米澤 敏男 , 坂井 悦郎 , 鯉渕 清 , 木之下 光男 , 釜野 博臣: エネルギー・CO2 ミニマム(ECM)セメント・コンクリートシステム, コンクリート工学 Concrete journal 48(9), 69-73, 2010-09-01
- 43) 閑田徹志・依田和久・米澤敏男・黒田萌:高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの構造体 強度に関する実験検討、コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013
- 44) 玉木伸二 , 齊藤和秀 , 若井修一 , 辻 大二郎 , 小川亜希子 , 松下哲郎 , 小島正朗 , 井上和政 : 高 炉スラグ高含有コンクリートの場所打ち杭への適用 : その 1. 室内実験, 日本建築学会学術講演梗概集 2015(材料施工), 541-542, 2015-09-04
- 45)(財)福井県建設技術公社:産学官共同研究報告書「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」 (温度ひび割れ・乾燥収縮ひび割れ低減型コンクリート)配合・製造および施工指針 (案), 平成19 年3月
- 46) 松家 武樹, 鈴木 康範, 堺 孝司, 福留 和人: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートに関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, 64 巻 (2010) 1 号 p. 295-302, 2010
- 47) 齋藤淳, 堺孝司, 鈴木康範, 福留和人: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートのひび割れ抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013
- 48) 齋藤 尚, 堺 孝司, 鈴木 康範, 松家 武樹: 低水結合材比におけるフライアッシュおよび高炉スラグ微 粉末を用いたローカーボンコンクリートの物性, セメント・コンクリート論文集, 65 巻 (2011) 1 号 p. 304-311, 2011
- 49) 黒田泰弘, 依田侑也, 片山行雄: 高炉セメントとフライアッシュを混合使用した低炭素コンクリート に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013
- 50) 小林謙介, 建築分野における LCA の活用実態と課題, 第 12 回日本 L C A 学会研究発表会講演要旨集 (2017 年 3 月)
- 51) CASBEE-住戸ユニット(新築)2014 年版の解説 http://www.ibec.or.jp/CASBEE/
- 52) BREEAM 認証マニュアル「BREEAM International New Construction Technical Manual」(2014 年) https://www.breeam.com/
- 53) グリーンビルディングジャパン HP https://www.gbj.or.jp/leed/
- 54) 環境省:環境ラベル等データベース https://www.env.go.jp/policy/hozen/green/ecolabel/

55) 日本建築学会: 建物の LCA 指針, 201

第3章 低炭素型高強度コンクリートの 基本コンセプトと性能評価

第3章 低炭素型高強度コンクリートの基本コンセプトと性能評価

3.1 はじめに

世界的な持続可能性に応える低炭素型社会の構築には、建設分野が果たす役割が大きく、低炭素型コンクリートの効果的運用が有効な技術になることが期待される.

第2章で調査・整理したとおり、日本の建設分野では、近年特に建設会社を中心に様々な技術開発が進められている。しかしながら、建設会社主導の低炭素型コンクリート開発への取り組みは、セメントの代替として副産物系混和材料を混入する概念は同じものの、建設会社ごとに混和材料の種類や置換率などの仕様が異なるため、実際の製造にあたっては、レディーミクストコンクリート工場(以下、生コン工場)のサイロや貯蔵ビンの中身を入れ替えたりする煩雑な作業が伴うことや、出荷期間中は特定の混和材料で設備の一部が占有状態となるなど、製造者の負担増大に繋がることが危惧されている。

さらには、建築工事においては、建築基準法や品確法などの法規制による制約や、短工期化への対応などが障壁となって、普及が進んでいないのが現状である。そういった状況を受けて、日本建築学会から発刊された「高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針(案)・同解説(2017年9月)」において高炉スラグ微粉末の含有率異なる低炭素型コンクリートを適材適所に用いることで、建築物全体の構造体コンクリートとして目標とする CO2 削減等級を満足するように検証する考え方が示された。よって、建築物に要求されるあらゆる条件において選択肢となりえるだけの、低炭素型コンクリートのメニューの拡充は今後必要になると想定される。しかし、高強度領域の低炭素型コンクリートに関する研究は多くなく、建築工事での実用化に必要な強度特性、耐久性等の諸性状に関して不明な点が多い。

そこで本章では、建築工事への適用を念頭においた、低炭素型高強度コンクリートに関する強度特性、耐久性の知見を拡充するための実験を行った結果を報告する.

3.2 低炭素型高強度コンクリートの基本コンセプト

2章で得た知見を基に、建築分野における低炭素型コンクリートの普及には、混和材種類、置換率や強度などによって異なる特徴を正しく認識したうえで、適材適所へ使用していくことが重要であることが分かった。しかし、強度レベルも含めた多角的な事前検討が必要になるにもかかわらず、高強度領域における知見が著しく少ないことが課題として示唆された。

そこで本章では、低炭素型高強度コンクリートを対象として実製造を想定した検討を行った。低炭素型高強度コンクリートの調合を決めるための、基本コンセプトとして、結合材の組合せおよび強度、耐久性等の目標性能を 3.2.1 項、3.2.2 項で示す。

3. 2. 1 結合材の組合せ

低炭素型高強度コンクリートの中で最も製造面から汎用的なのは,第2章で示したとおり高炉セメント B種(以下,BB)が日本国内ほとんどの生コン工場で標準化されていることから,BBを使用した高強度コンクリートといえる。しかし,高強度領域のコンクリートは,結合材量が多いことから,温度ひび割れや自己収縮ひび割れによる品質の低下に注意しなければならず,BBではそれらの影響がより顕著に生じることが指摘されている。

一方で、BB にフライアッシュ(以下、FA)を混合するような 3 成分系のコンクリートとすることで、BB 単体のコンクリートよりも、同程度の力学性能を保持したまま、温度ひび割れ、自己収縮ひび割れのリスクを低減できることが報告されている結果や、高強度領域で問題となることが多い高粘性化による施工性の低下現象を FA の混合による流動性改善効果により解決できる可能性が高いことなどを考慮して、本研究における低炭素型高強度コンクリートに用いる結合材の組合せとして、BB に FA を置換した 3 成分系とした.

BB に含まれる高炉スラグ微粉末(以下, BFS)の含有量が 45%と仮定した場合, FA の置換率を 10, 20, 30%とした時の結合材中の OPC, BFS および FA の混合割合は表 3-2-1 のようになる.

表 3-2-1 BB に FA を置換した低炭素型高強度コンクリートの結合材中の BFS, FA の混合割合

組合せ比率	結合	BFS+FA		
利日 C 10年	OPC	BFS	FA	置換率
BB7 : FA3	38.5	31.5	30.0	61.5
BB8 : FA2	44.0	36.0	20.0	56.0
BB9 : FA1	49.5	40.5	10.0	50.5

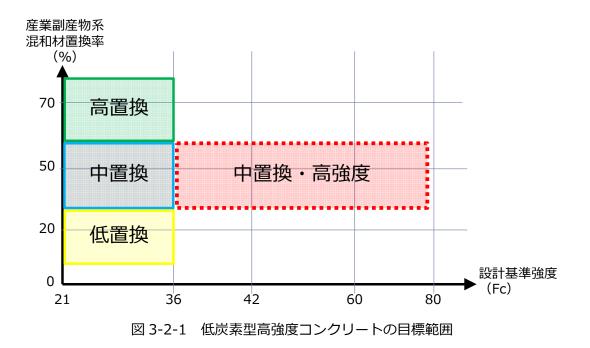
3. 2. 2 目標性能

低炭素型高強度コンクリートとして目標性能を表 3-2-2 に示す. 目標とする強度レベルは, 建築工事で使用実績が多い高強度コンクリートの設計基準強度 39~80N/mm² を満足するものを想定し, 管理強度用の標準養生供試体で 60~100 N/mm² 程度とした. 耐久性においては, 地上躯体への使用を前提に, 品確法で示される劣化等級 3 と同程度の中性化抵抗性が得られることとし, 自己収縮および発熱特性がBB 単体のコンクリートよりも優れることとした.

要因	目標性能
圧縮強度(標準養生:材齢 28 日)	60~100 N/mm ² 程度
中性化抵抗性	品確法 劣化等級 3 と同程度
自己収縮	BB 単体よりも小さい
温度上昇量	BB 単体よりも低い

表 3-2-2 低炭素型高強度コンクリートの目標性能

本研究における低炭素型高強度コンクリートの目標範囲を強度と置換率の関係から示すと図 3-2-1 のようになる.



65

3.3 性能評価

3.3.1 実験概要

BBにFAを混合した低炭素型高強度コンクリートの強度、耐久性(中性化,凍結融解抵抗性,自己収縮) および発熱特性といった基礎的性状を把握するにあたって、本項では W/B=17, 20, 25%, FA 置換率 10, 20, 30%の 9 水準の低炭素型高強度コンクリートについて、各種実験を行った結果について報告する・

(1) 使用材料

コンクリートの使用材料を表 3-3-1 に示す・本項では、BB 中に含まれる BFS 含有量の変動による影響を排除するために、BB 中の含有量 45%に相当する BFS を別途計量して使用した. フライアッシュは、コンクリート用混和材として広く使用されている II 種品を使用した.

		普通ポルトランドセメント	
	OPC	(密度 3.15g/cm ³)	
∀ +△++	DEC.	高炉スラグ微粉末	
結合材 	BFS	(密度 2.89g/cm³,比表面積 4270cm²/g)	
	FA	フライアッシュ Ⅱ 種	
		(密度 2.31g/cm ³ ,比表面積 4220cm ² /g)	
細骨材	S	大月産安山岩砕砂(表乾密度 2.62g/cm³)	
粗骨材	G	大井川産川砂(表乾密度 2.62g/cm³)	
混和剤	Ad	ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤	

表 3-3-1 使用材料

(2) コンクリートの調合および製造

コンクリートの調合を表 3-3-2 に示す. 単位水量 140kg/m³, 粗骨材量 850kg/m³を一定として, 目標空気量を 2.0%として各 W/B および結合材の混合比率を満足ように計画した.

コンクリートの練混ぜには水平二軸強制練りミキサ(60ℓ)を使用した・高性能減水剤の添加率は、 結合材質量比で 0.75~2.50%の範囲とし、練上がり後のスランプフローが 500mm 以上かつ分離しな いように設定した・

表 3-3-2 コンクリートの調合

No.	W/B	空気量	単位量(kg/m³)			
		(%)	結合材	水	細骨材*	粗骨材
1	17		824	140	574	850
2	20		700	140	692	850
3	25		560	140	824	850
4	17		824	140	597	850
5	20	2.0	700	140	711	850
6	25		560	140	839	850
7	17		824	140	619	850
8	20		700	140	729	850
9	25		560	140	854	850

(3) 試験項目および方法

試験項目および試験方法を表 3-3-3 に示す・

表 3-3-3 試験項目および試験方法

試験項目		試験方法			
フレッシュコ	スランプフロー	JIS A 1150			
ンクリート	フロー時間	ストップウォッチ使用, 50cm フロー到達時間			
	空気量	JIS A 1128			
	コンクリート温度	JIS A 1156			
	分離抵抗性	目視確認による			
硬化コンクリ	圧縮強度	供試体:JIS A 1132 に準拠して作製			
		試験材齢:7,28,56および91日			
	自己収縮	日本コンクリート工学協会 自己収縮研究委員会「モール			
		ドゲージ法(簡易法)」			
	中性化	JIS A 1153			
	凍結融解	JIS A 1148			
	/朱祁山附近 州 年	水中凍結融解試験方法(A 法)			
14	听熱温度上昇量	日本コンクリート工学協会 品質評価試験方法研究委員			
	引然/画友 上 升里	会報告書「コンクリートの断熱温度上昇試験方法(案)」			

3.3.2 実験結果および考察

(1) フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリート試験結果を表 3-3-4 に示す・空気量は 2.0~3.2%の範囲にあり、W/Bや結合材の混合割合によらず安定して制御できることが確認された・スランプフローは 515~795mm の範囲にあり、795mm の比較的大きいものでも材料分離は確認されなかった(写真 3-3-1)・

図 3-3-1 に各 W/B のスランプフローの測定結果を示す・W/B=20%, 25%で示されるように, 同程度の高性能 AE 減水剤の添加量の場合には, FA 置換率が高いほど, スランプフローが大きくなっている・また, W/B=17%では, FA 置換率が高くなるほど, 同程度のスランプフローを得る為の高性能 AE 減水剤の添加量が少なくなっている・これらのことから, FA の置換率が高いほど, フレッシュ時の流動性が良くなることがわかる・これは, FA 粒子の大部分が滑らかなガラス球状であることに由来するコンクリートのワーカビリティーの改善効果と判断できる.

なお、W/B=20%以下の調合では、50cm 通過時間からも分かるように、FA を 30%まで置換しても 非常に粘性が高かったことから、実際の適用にあたっては、使用する骨材などの影響も考慮し製造や施 工性に支障がない流動性が確保できる W/B を事前に把握する必要がある・

混和剤添加率 空気量 スランプフロー W/B BB:FA No. 50cm 通過時間 (%)C×% フロー値 (mm) % (sec) 7:3 17 765 1 1.6 60 3.2 2 7:3 795 20 1.0 34 2.0 3 7:3 25 0.9 720 13 2.8 4 8:2 17 1.9 780 33 2.5 5 0.9 8:2 20 658 41 2.7 6 8:2 25 1.0 788 12 2.0 7 9:1 17 2.0 795 31 2.4 8 9:1 20 1.1 540 55 2.4 9:1 25 0.9 515 30 2.6

表 3-3-4 フレッシュコンクリート試験結果

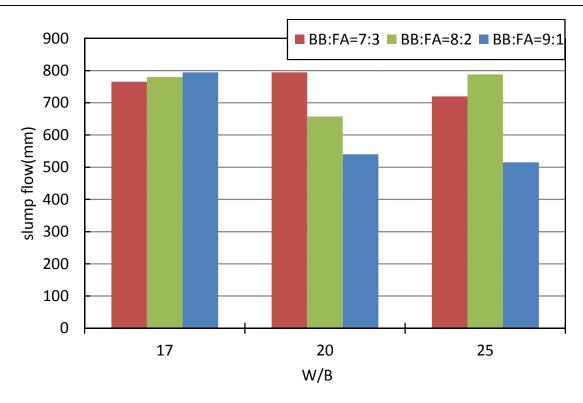


図 3-3-1 スランプフローの測定結果



写真 3-3-1 スランプフロー性状 (No.8)

(2) 圧縮強度

図 3-3-2 に圧縮強度試験結果を示す. いずれの調合でも, 材齢 91 日において 100N/mm²以上の圧縮強度を示しており, 標準偏差や強度補正等の影響を考慮しても設計基準強度 60 超の高強度コンクリートの実現が期待できるポテンシャルを有していることが確認できた・

FA の置換率による圧縮強度への影響をみると、FA の置換率が増えるほど、強度発現ならびに材齢 91 日強度は低くなる傾向が確認された・

図 3-3-3 に結合材水比と圧縮強度の関係を示す・いずれの結合材の比率でも、結合材水比と圧縮強度 には線形関係が確認され、通常の調合設計と同様に、結合材水比の回帰式によって、強度採用式を構築 できるものと判断される・

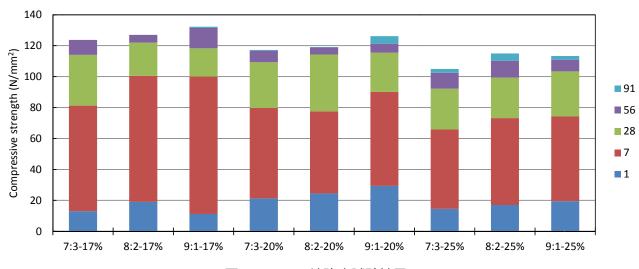


図 3-3-2 圧縮強度試験結果

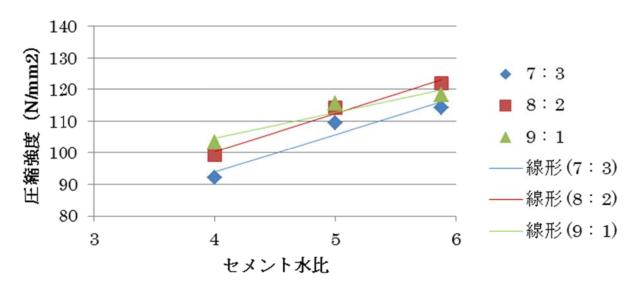


図 3-3-3 結合材水比と圧縮強度の関係(標準養生材齢 28 日結果より)

(3) 中性化

No.1~9の調合に対して、促進中性化試験を実施した結果、促進期間 26 週においても中性化の進行は認められなかった. 写真 3-3-2 には FA 置換率 30%の各 W/B の促進中性化試験 26 週経過後のフェノールフタレイン溶液噴霧後を示すが、いずれも中性化が進行していないことがわかる.

中性化速度に影響を及ぼす主な調合要因として W/C に注目すると、岸谷式および白山式では、水セメント比が 38%以下では中性化速度は 0 になり、中性化が進行しないものとされている・本検討領域では、 FA 置換率 30%の各 W/B を W/OPC に換算すると、それぞれ 44%、52%、65%となることから、BFS や FA による中性化抵抗性の寄与率がある程度期待できることを裏付ける結果であるといえる.

なお、品確法の住宅性能表示制度において、鉄筋コンクリート造および鉄骨鉄筋コンクリート造の住宅に対して、劣化対策等級3および等級2を表示するためには、「コンクリートのW/Cの算定に当たり、フライアッシュセメントを使用する場合は混合物を除いた部分を、高炉セメントに含まれる高炉スラグの10分の3を除いた部分をその重量として用いるものとする。」と規定されている。同規定による計算を行うとFA置換率30%の各W/Bは、28%、33%、41%となり、品確法上も劣化等級3を取得することが可能なW/Bの範囲であることがわかる。

以上より、BB に FA を置換したコンクリートにおいても、FA30%までの範囲において、水結合材比を小さくすることで高い中性化抵抗性が得られることが確認された.

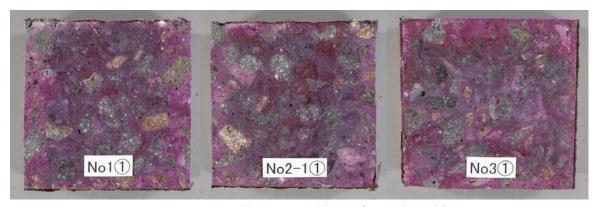


写真 3-3-2 中性化促進試験結果(26 週経過後)

(4) 自己収縮

自己収縮は、10×10×40cm の角柱供試体を用いて、材軸方向の中央部に埋め込みひずみ計を埋め込んで、若材齢からの自己収縮ひずみを測定した・供試体は、コンクリート打設後、直ちに封緘養生とし、翌日脱型後、封緘養生を継続したまま 20℃、60%RH の恒温高湿室で放置した・

図 3-3-4 に FA 置換率 30%で W/B が異なる No.1, 2, 3 の自己収縮測定結果を示す. 自己収縮ひずみには,一般的な高強度領域のコンクリート同様に, W/B が小さくなるほど顕著に大きくなる傾向が認められた.

図 3-3-5 には, FA 置換率による影響を確認するため, W/B が 20%一定で BB:FA 比率が異なる No.2 (FA 置換率 30%), No.5 (FA 置換率 20%), No.8 (FA 置換率 10%) の結果を示す・その結果, FA 置換率が高くなるほど, 自己収縮ひずみが小さくなる傾向が認められた.

以上より, BB に FA を置換したコンクリートにおいても, W/B が小さくなるに従い, 自己収縮ひずみが大きくなる傾向にあるが, FA を置換することで置換率に応じて自己収縮ひずみは小さく傾向が確認できた.

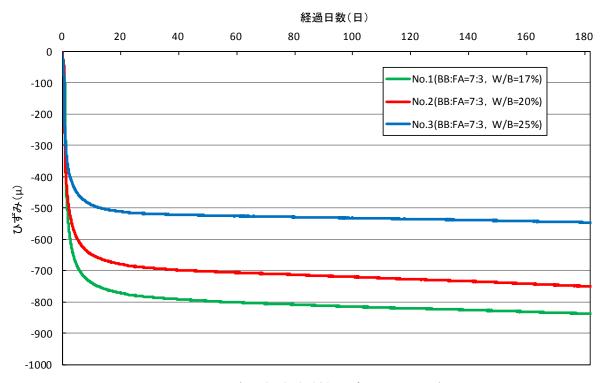


図 3-3-4 自己収縮試験結果(No.1, 2, 3)

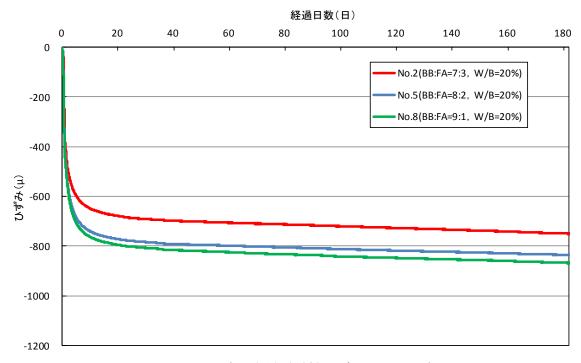


図 3-3-5 自己収縮試験結果(No.2, 5, 8)

(5) 凍結融解

凍結融解試験の結果を図 3-3-6 に示す・図中に示した相対動弾性係数 85%のラインは JASS5 26 節「凍結融解作用を受けるコンクリート」で示される激しい凍結融解作用を受けても明確な劣化が生じない値(85%)である・いずれの調合も凍結融解 300 サイクルにおける相対動弾性係数が 85%以上を保っていることから、BB に FA を置換したコンクリートにおいても、W/B=25%以下の低水結合材比の高強度領域では、空気量が 2%程度であっても、一定の凍結融解抵抗性を有しているといえる・

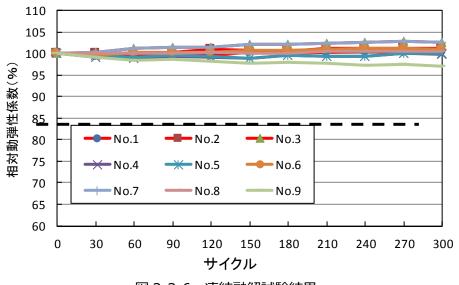
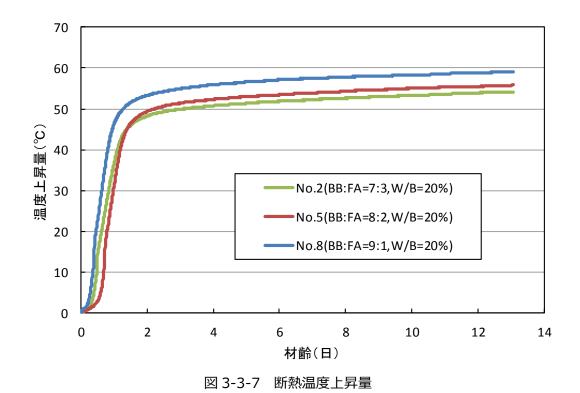


図 3-3-6 凍結融解試験結果

(6) 断熱温度上昇

空気循環式の断熱温度上昇試験装置を用いて, FA の置換率による発熱特性を確認するため, W/B が 20%一定で BB:FA 比率が異なる No.2 (FA 置換率 30%), No.5 (FA 置換率 20%), No.8 (FA 置換率 10%) を対象に, コンクリートの打設温度 20℃の条件における水和発熱過程の温度上昇量を測定した. 測定結果を図 3-3-7 に示す.

FA の置換率が高くなるほど断熱温度上昇量が小さくなることが確認でき,マスコンクリートの適用など,温度ひび割れが懸念されるような部位に使用した場合には,N や BB に比べて温度ひび割れ抑制効果が期待できると思われる.



74

3. 4 実機実験

建築物の基礎,主要構造部その他安全上重要である部分に使用する指定建築材料は,建築基準法第 37 条によって JIS に適合するもの,または国土交通大臣が基準に適合するものとして認定したものでなければならない. 鉄筋コンクリート造建築物に使用するコンクリートは,指定建築材料に指定されており, JIS (現在は JIS A 5308-2014「レディーミクストコンクリート」)に適合したコンクリートを用いるのが一般的である. しかし, JIS A 5308-2014では,コンクリートの種類のうち普通コンクリートにつは呼び強度 45 まで,また高強度コンクリートについては呼び強度 60 までしか規定されておらず,従って強度補正値等を考慮すると,設計基準強度 60N/mm² クラスの高強度コンクリートは適用外となり対応できない. そのため,国土交通大臣が認定したコンクリートとしなければならない.

これは、本章で検討しているような BB に FA を置換した低炭素型高強度コンクリートにおいても同様である。そのため本節では、実際の建築工事への適用を想定した国土交通大臣の認定を前提としたレディーミクストコンクリート工場での実機製造実験による各種性能を検討した。

3.4.1 実験概要

実機試験は、首都圏に供給可能な東京湾沿岸部に位置するレディーミクストコンクリート工場において、夏期、標準期および冬期にわたって実施した。フレッシュ性状および圧縮強度の検討は、レディーミクストコンクリート工場の実機製造設備で製造(以下、実機製造)されたコンクリートで実施し、耐久性および発熱特性に関する試験は、実機製造と同一材料を用いた室内試験により実施した。

(1) 使用材料

使用材料を表 3-4-1 に、使用した FA の品質試験値を表 3-4-2 に示す. FA は、FA II 種で、かつ JASS5M-401 の品質基準に適合するものを使用した. BB や骨材は、製造工場で標準化されているもの を用いた.

材料(記号)	種類・産地等	物性値
セメント (BB)	高炉セメント B 種	密度:3.04(g/cm³)
混和材(FA)	フライアッシュ Ⅱ 種(竹原産)	表 3-4-2 参照
細骨材(S1)	山砂(千葉県富津市鶴岡)	密度:2.60(g/cm³)
細骨材(S2)	石灰砕砂(高知県吾川郡仁淀川)	密度:2.65(g/cm³)
粗骨材(G)	砕石 2005(高知県吾川郡仁淀川)	密度:2.71(g/cm³)
位自初(U)	叶石 2003(同风采日川市仁龙川)	実績率:58.3(%)

表 3-4-1 使用材料

混和剤(SP)	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系
	= 2 4 2 	

表 3-4-2 FA の品質試験値

		品質項目						
		強熱減量	密度	いまるほ	フロー値	活性度指数(%)		
		(%) (g/cm ³)		比表面積 (cm²/g)	比 (%)	材令 28 日	材令 91 日	
搬入月		1.6	2.19	3990	107	88	103	
	最大値	2.6	2.34	4380	116	89	106	
2015	最小値	1.3	2.19	3960	105	82	99	
年	平均値	1.9	2.28	4167	110	86.5	102.8	
	標準偏差(σ)	0.4	0.04	151	2.9	2	2.8	
JIS A 6201 規格値		5.0以下	1.95 以上	2500以上	95 以上	80 以上	90 以上	
JASS5M-401 品質基 準		4.0以下	_	3000以上	100以上	_	_	

(2) コンクリートの調合および製造

コンクリートの調合を表 3-4-3 に示す. FA の置換率については, 置換率が 30%になると初期強度低下が大きいことや, 事前試し練りにより FA 置換率が 20%と 30%で流動性に差がなかったこと等を考慮して 20%とした.

高性能 単位量 (kg/m³) 空気量 W/B 調合記号 AE 減水剤* (%) (%) W C FA **S**1 **S**2 G $(C\times\%)$ BBFA20 - 40 - 55170 340 507 907 40 85 346 1.35 BBFA20 - 30 - 602 30 170 454 113 439 298 891 1.55 BBFA20 - 24 - 65875 24 170 566 142 372 253 1.25

表 3-4-3 コンクリートの調合

(3) 試験項目および方法

試験項目および参照した試験方法を表 3-4-4 に示す. フレッシュコンクリートの測定はコンクリート練り上がりから 30 分間隔で 120 分まで実施した. 圧縮強度試験は,標準養生供試体に加えて,構造体コンクリート強度推定のため, JASS5T-605 (コア供試体による構造体コンクリート強度の推定方法)

に従った実構造体の寸法形状を想定した模擬柱部材試験体を作製し、それから採取したコア供試体も作製した. さらに、参考に JASS5T-606 (簡易断熱養生供試体による構造体コンクリート強度の推定方法) に準拠した簡易断熱試験体による強度確認も実施した (図 3-4-1).

耐久性試験は中性化、乾燥収縮、凍結融解および自己収縮を、発熱性試験は、断熱温度上昇をそれぞれ表 3-4-4 に示す試験方法に準拠して実施した.

表 3-4-4 試験項目および参照した試験方法

試験項目	参照した試験方法				
スランプフロー	JIS A 1150 コンクリートのスランプフロー試験方法				
フレッシュコンクリートの	JIS A 1156 フレッシュコンクリートの温度測定方法				
温度	JIS A 1136 フレッシュコングリートの温度測定力法				
空気量	JIS A 1128 フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法				
工刈里	-空気室圧力方法				
圧縮強度試験	JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法				
静弾性係数試験	JIS A 1149 コンクリートの静弾性係数試験方法				
中性化	JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験方法				
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	JIS A 1129-3 モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法-第 3				
平石/木 4X利日	部:ダイヤルゲージ方法				
凍結融解	JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法				
自己収縮	日本コンクリート工学協会 自己収縮研究委員会「モールドゲージ法				
	(簡易法)」				
断熱温度上昇	日本コンクリート工学協会 品質評価試験方法研究委員会報告書「コ				
凹	ンクリートの断熱温度上昇試験方法(案)」				

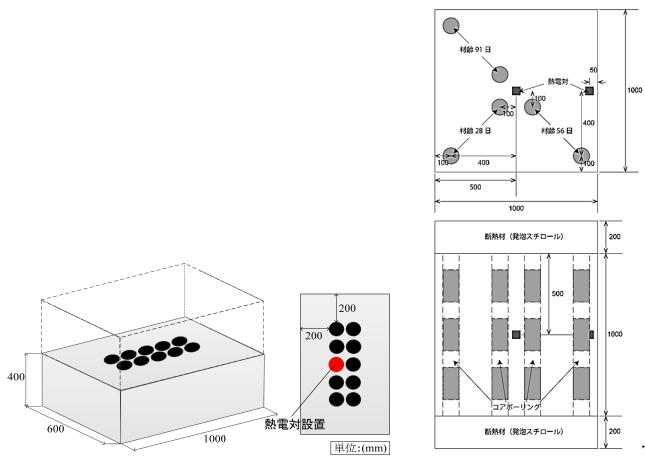


図 3-4-1 簡易断熱養生箱 (左), 実大模擬試験体(右) 概要

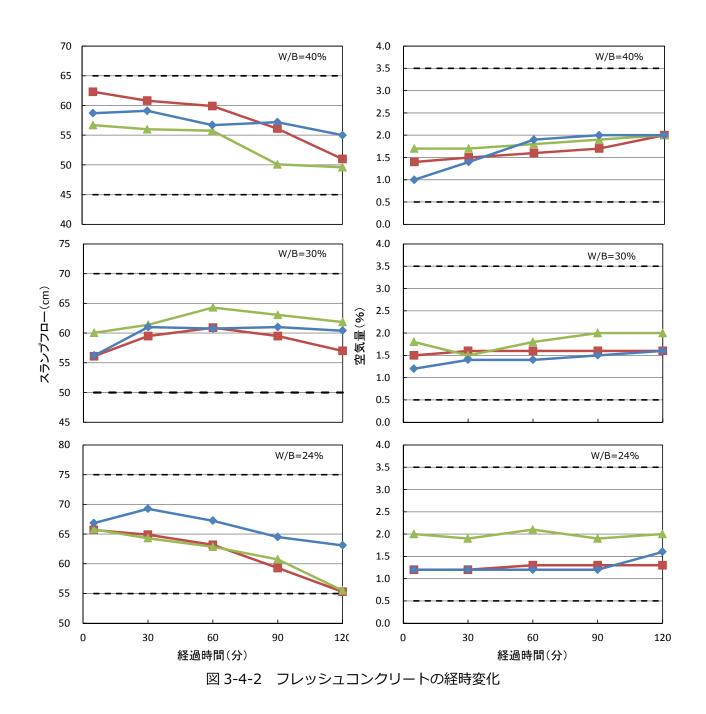


写真 3-4-1 実大模擬試験体作製状況

3. 4. 2 実験結果および考察

(1) フレッシュコンクリートの性状

図 3-4-2 にスランプフローおよび空気量の経過時間に伴う測定結果を示す. スランプフローおよび空気量の結果は、いずれの調合、打設時期においても 120 分経過後まで目標範囲内にあった.



79

(2) 模擬柱部材及び簡易断熱養生の温度履歴

実機試験練りで作製した模擬柱部材試験体の中心及び外側と簡易断熱養生供試体の温度履歴を測定した。表 3-4-5 に、模擬柱部材試験体(中心,外側)および簡易断熱養生供試体の最高温度を示す。また、図 3-4-3,図 3-4-4 に、これらの温度履歴を示す。

表 3-4-5 模擬柱部材試験体の中心及び外側の最高温度

n± #0	W/D	模擬柱最高	高温度(℃)	簡易断熱養生
時期	W/B	中心	外側	最高温度(℃)
	40	60.7	49.1	53.6
夏期	30	72.9	59.0	65.9
	24	81.2	65.4	71.5
	40	56.7	47.2	49.4
標準期	30	69.0	57.4	61.4
	24	77.5	66.3	67.8
	40	40.5	35.3	33.8
冬期	30	56.1	49.4	44.5
	24	65.5	54.9	53.8

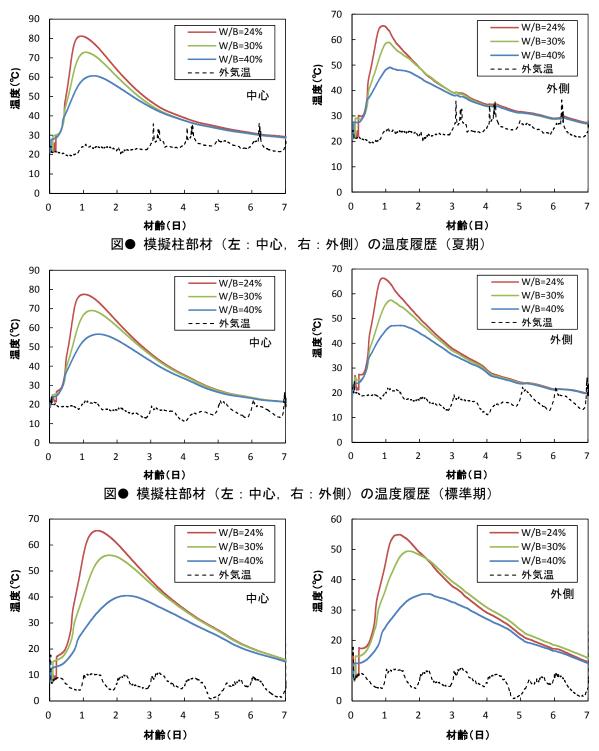


図 3-4-3 模擬柱部材 (左:中心,右:外側)の温度履歴 (冬期)

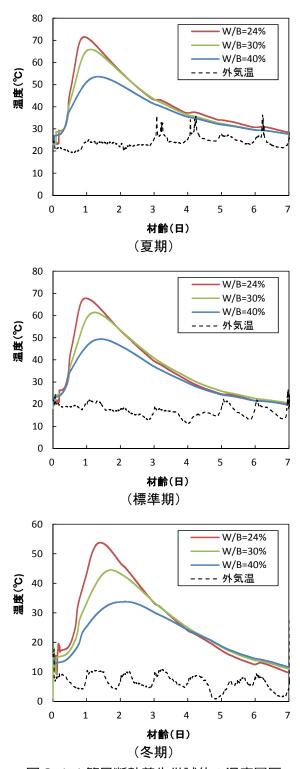


図 3-4-4 簡易断熱養生供試体の温度履歴

(3) 圧縮強度

表 3-4-6, 図 3-4-5 に各種供試体の圧縮強度試験結果を示す. いずれの供試体の場合でも, 材齢の経過に伴って強度が増進する傾向が見られるが, 模擬柱部材から採取したコア供試体および簡易断熱養生供試体では, 材齢 28 日から 91 日までの強度増進が小さい.

これは、参考文献 1) で示されるように、BFS を使用したコンクリートが高温履歴を受けると材齢 28 日から 91 日の強度増進が僅かであるといった報告と整合する.

表 3-4-6 圧縮強度試験結果

			採取	圧縮強度 (N/mm²)				
打設時期	W/B	養生条件	時間	材齢 (日)				
			(分)	7	28	56	91	
		標準		45.8	63.5	68.9	74.2	
	40%	コア強度	30	_	56.9	62.5	63.9	
		簡易断熱		_	58.2	60	61.4	
		標準		65.0	82.5	88.8	95.9	
夏期	30%	コア強度	30	_	70.8	74.4	73.7	
		簡易断熱		_	70.1	71.8	74.6	
		標準		75.8	94.8	99.5	99.4	
	24%	コア強度	30	_	77.2	78.3	81.9	
		簡易断熱		_	75.6	76.6	77.7	
		標準		46.9	65.5	72.9	74.8	
	40%	コア強度	30	_	57.3	60.6	59.7	
		簡易断熱		_	58.8	60.9	64.6	
	30%	標準		67.4	86.4	91.0	96.9	
標準期		コア強度	30	_	74.9	75.5	75.6	
		簡易断熱		_	74.5	77.0	78.7	
		標準		86.2	103	112	117	
	24%	コア強度	30	_	85.7	87.5	88.8	
		簡易断熱		_	83.7	86.0	86.2	
		標準		46.6	66.7	75.3	80.9	
	40%	コア強度	30	_	52.9	61.8	64.9	
		簡易断熱		_	54.4	61.5	66.1	
		標準		73.6	88.0	97.1	106	
冬期	30%	コア強度	30	_	74.9	81.9	83.6	
		簡易断熱		_	81.4	86.2	90.0	
		標準		90.7	107	118	122	
	24%	コア強度	30		86.7	92.6	91.2	
		簡易断熱		_	87.0	93.2	94.9	

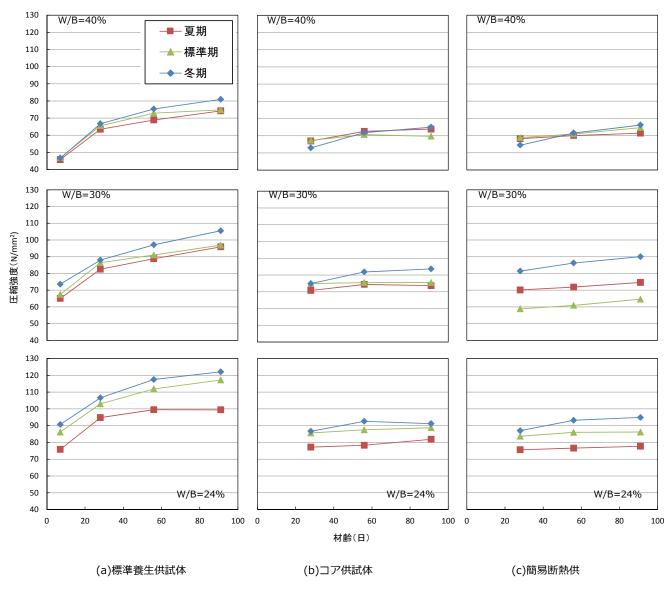


図 3-4-5 各種供試体の強度性状

(4) 中性化

促進中性化試験の結果を図 3-4-6 に示す. W/B=40%, 30%では, 中性化の進行が確認され, 中性化 速度係数はそれぞれ 2.89, 0.86 となり, W/B=24%では中性化の進行が認められなかった.

建築工事標準仕様書・同解説 JASS5「鉄筋コンクリート工事」²⁾ では、中性化促進試験の結果において、セメント種類に関係なく、試験開始時の圧縮強度の逆数と中性化速度係数は直線関係にあることが示されており、耐久設計の考え方の根底となっている。また、文献³⁾ では、FA を使用したコンクリートの水ポルトランドセメント比(以下、W/C)と中性化速度係数の関係式が記載されていることから、BB や FA を使用したコンクリートにおいても、中性化速度係数を適切に捉えることで耐久設計に基づく調合計画を定めることができると判断される。

一方で、「住宅の品質確保の促進等に関する法律」(以下、品確法)の住宅性能表示制度において、鉄筋コンクリート造および鉄骨鉄筋コンクリート造の住宅に対して、劣化対策等級3および等級2を表示するためのW/Cの考え方には、「コンクリートのW/Cの算定に当たり、フライアッシュセメントを使用する場合にあっては混合物を除いた部分を、高炉セメントに含まれる高炉スラグの10分の3を除いた部分をその重量として用いるものとする。」と規定されている。

そこで、品確法による考え方を BB に FA を混入したコンクリートに適用した場合の合理性を確認するため、本実験結果から得られた W/B と中性化速度係数の関係を、品確法で規定される W/C に換算した結果を図 3-4-7 に示す。また、図 3-4-7 には、文献 ^{3), 4)} で示されている W/C と中性化速度係数の関係式による推定値を併せて示している。結合材として GGBFS および FA を全量含む W/B を横軸にとった場合、概ね線形的な関係は認められ、W/B が 24.5%以下では中性化速度係数は 0 になる。一方で、品確法に従って換算した W/C を横軸にとった場合では、文献 ^{3),4)}の関係式と同等の直線関係にあり、W/C が 38%以下では中性化速度係数が 0 になるという文献 ⁴⁾ で示される提案式と一致する。

以上より、BB に FA を混入した低炭素型コンクリートであっても、品確法上の W/C の算定方法を採用することで、普通コンクリートと同様の考え方で合理的に中性化抵抗性を評価できると思われる.

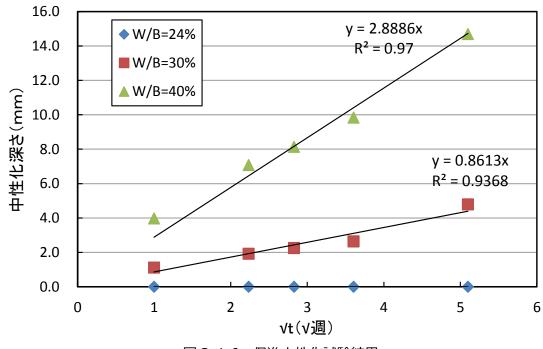


図 3-4-6 促進中性化試験結果

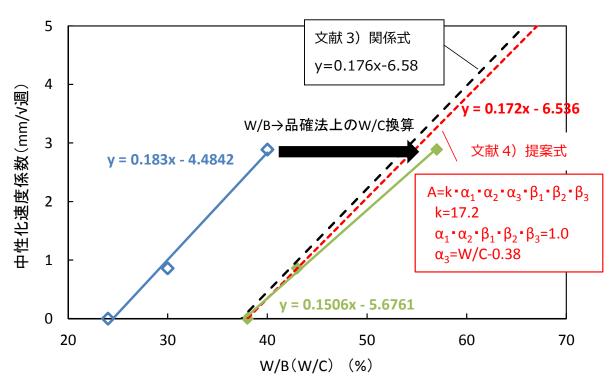


図 3-4-7 W/B と中性化速度係数の関係

(5) 自己収縮・乾燥収縮

図 3-4-8 に乾燥収縮試験結果を示す. 経過日数 182 日での乾燥収縮ひずみは, W/B=40%, 30%で 450×10^{-6} 程度, W/B=24%では 350×10^{-6} 程度であった. 高強度コンクリートの乾燥収縮ひずみは, 水結合材比が小さいほど乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向があり, 本測定結果も同様の傾向といえる.

図 3-4-9 に自己収縮試験結果を示す。自己収縮ひずみは経過日数 91 日において、W/B=40%、30% が 220~280×10⁻⁶ に対して、W/B=24%は 550×10⁻⁶ 程度と大きな差が認められた。自己収縮ひずみは、水結合材比が小さくなるほど大きくなることが指摘されているが、宮澤ら⁵⁾ は、種々のセメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみの予測式を提案しており、比表面積が 4000cm²/g 程度以下の高炉スラグ微粉末を用いた BB では、普通ポルトランドセメント(以下、NC)を用いた場合に比べて、W/C=20~40%の範囲で自己収縮ひずみは同等もしくは若干減少することを示している。

図 3-4-10 に材齢 91 日における W/B と自己収縮ひずみの関係を, 宮澤らによる提案式 ⁵⁾ による BB の計算値と併せて示すが, W/B=30%から W/B=20%にかけて, 顕著に自己収縮ひずみが大きくなる挙動が認められ, 提案式の傾向と一致する.

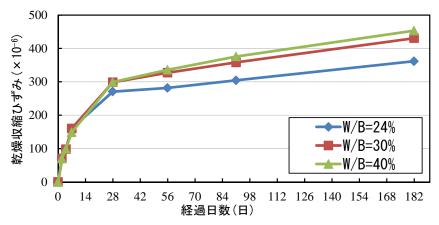
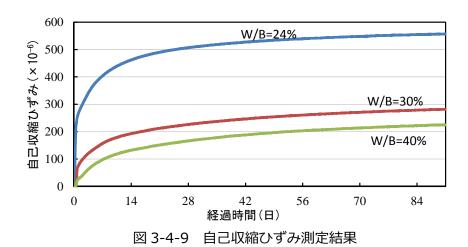


図 3-4-8 乾燥収縮ひずみ測定結果



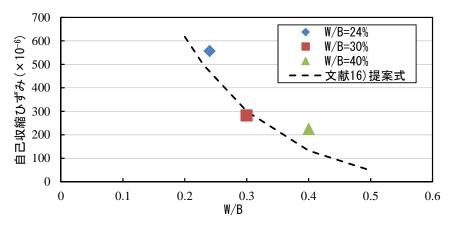


図 3-4-10 材齢 91 日における W/B と自己収縮ひずみの関係

(6) 凍結融解

凍結融解試験の結果から、サイクル数と相対動弾性係数の関係を図 3-4-11 に示す。W/B=24%では、300 サイクル時点においても、相対動弾性係数の低下はみられず、空気量 2%程度であっても十分な凍結融解抵抗性を有していることが確認された。W/B=30%では、120 サイクルで相対動弾性係数が約40%まで低下した後、150 サイクルで崩壊した。W/B=40%では、30 サイクル時点で、試験体が崩壊しており、凍結融解抵抗性が著しく劣る結果となった。

本結果では W/B=24%と W/B=30%との間で耐凍害性に大きな差が認められ,凍結融解作用を受ける環境での使用に際しては、耐凍害性を確保するための検証を行う必要がある.

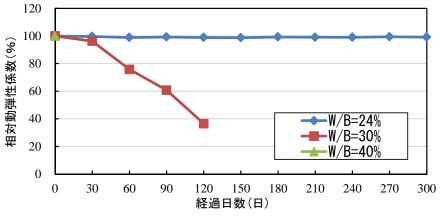


図 3-4-11 凍結融解試験の結果

(7) 断熱温度上昇

断熱温度上昇試験の結果を図 3-4-12 に示す. BB に FA を 20%置換したコンクリートの W/B=40, 30, 24%の断熱温度上昇量は, 経過時間 10 日時点で 47~63℃となった.図 3-4-12 には, 同一の骨材, 調合条件での NC および BB の W/C=24%で実施した試験結果も参考に示すが、NC, BB の断熱温度上昇量は経過時間 10 日時点でそれぞれ 78~80℃であった. これより,BB に FA を 20%置換することによって,約 17℃の温度上昇量の抑制効果が認められ,マスコンクリート等の温度応力が大きい部材での温度ひび割れ効果が期待できることが示唆された.

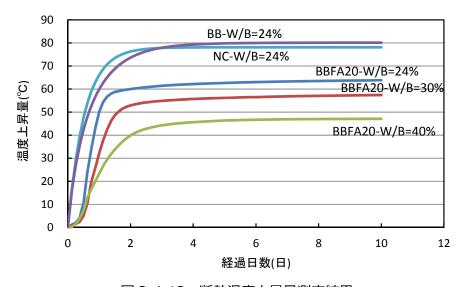


図 3-4-12 断熱温度上昇量測定結果

3. 4. 3 構造体補正強度に関する考察

調合設計において、調合強度を求める際に、標準養生した供試体の材齢 28 日における圧縮強度と構造体供試体の材齢 91 日における圧縮強度との差(S 値)が必要となる。ここでは標準養生の材齢を 28 日とし、構造体コンクリートの材齢を 91 日として S 値(28S91)の検討を行った。

通常,高強度コンクリートにおけるS値の設定においては,実験結果より得られた28S91値及びその回帰式をもとに安全を考慮し包含する値を整数に丸め、採用S値を求める方法が行われる.

表 3-4-7 に、今回の実験で求めた $_{28}S_{91}$ 値を示す。また、図 3-4-13 に結合材水比と $_{28}S_{91}$ 値の関係を示す。結合材水比が小さい調合において、標準期の S 値が夏期および冬期に比べると高い数値であるものの、すべての S 値よりも安全側になることを考慮して、標準期試験で得られた S 値を通年で採用することが妥当と考える。その場合の採用 S 値を表 3-4-8 に示す。

この結果は、告示で示される普通ポルトランドセメントや中庸熱ポルトランドセメントの S 値と比較して、非常に非常に大きいことが分かる。すなわち、その分だけ調合強度の割増のため、W/B を低く設定しなければならず、経済性、CO2排出量ともに不利になることが大きな課題となる。

表 3-4-7 実験で得られた 28S91 値

W/B	D /\/	$_{28}S_{91}$ (N/mm ²)				
(%)	B/W	夏期	標準期	冬期		
40	2.500	-0.4	5.8	1.8		
30	3.333	8.8	10.8	4.4		
24	4.167	12.9	14.2	15.4		

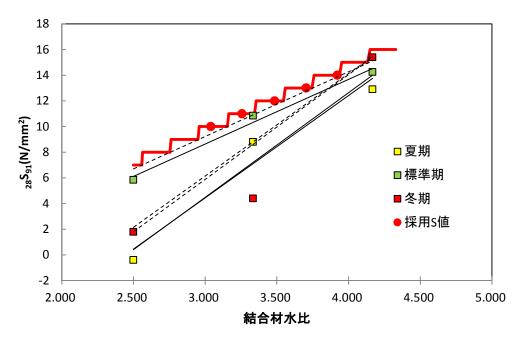


図 3-4-13 結合材水比と 28S91 値の関係

表 3-4-8 圧縮強度の基準値(設計基準強度)と構造体強度補正値との関係

	スランプ	空気量	適用期間	圧縮強度の基準値(設計基準強度)(N/mm²)				
S 値	S値 フロー	(%)		48	51	54	57	60
₂₈ S ₉₁	55 60 65	2.0	通年	10	11	12	13	14

3.5 まとめ

本章では、建築工事への適用を念頭においた、低炭素型高強度コンクリートに関する強度特性、耐久性の知見を拡充するための実験を行った。室内実験による検証で得られた知見をまとめると以下のようになる。

- 1)FA を置換することによる流動性改善効果が期待できることを確認した. 但し, ある一定の低 W/B の場合には, 粘性が過大となり FA による流動性改善効果がみられない.
- 2)強度性状については、W/B=25%程度であれば、FA 置換率が 30%までの範囲において Fc60N/mm² を十分達成可能なポテンシャルを有する.
- 3)FA 置換により、自己収縮が小さくなるため、ひび割れ抑制効果が期待できる.
- 4) FA 置換率 30%であっても W/B=25%クラスの高強度領域では、中性化がほとんど進行せず、劣化 等級 3 を取得可能
- 5) FA 置換により温度上昇量が抑制できるため、温度ひび割れ抑制効果が期待できる.

また、実機実験による検討で得られた知見をまとめると以下のようになる.

- 1)スランプフローおよび空気量の経過時間に伴う測定結果は、いずれの調合、打設時期においても 120 分経過後まで目標範囲内にあった。
- 2)強度性状については、いずれの供試体の場合でも、材齢の経過に伴って強度が増進する傾向が見られるが、模擬柱部材のコア供試体および簡易断熱養生供試体では、標準養生に比べて材齢 28 日から 91 日までの強度増進が小さい傾向にある.
- \rightarrow この結果から S 値が大きくなることで,実際の調合設計においては,その分だけ調合強度の割増のため,W/B を低く設定しなければならず,経済性, CO_2 排出量ともに不利になることが大きな課題となる.
- 3)中性化の進行は W/B による顕著な差が確認され、品確法上の W/C の算定方法を採用することで、適当かつ安全側に中性化抵抗性を評価できる.
- 4)乾燥収縮ひずみは、W/B が小さくなるほど、小さくなる傾向にあるが、自己収縮ひずみは W/B が小さくなるほどより顕著に大きくなる.
- 5)凍結融解試験の結果から、W/B=24%では、300 サイクル終了時点においても、相対動弾性係数の低下はみられず、空気量 2%程度であっても十分な凍結融解抵抗性を有していることが確認されたが、W/B=30%、W/B=40%では、それぞれ 150、30 サイクル時点で、試験体が崩壊しており、凍結融解抵抗性が著しく劣る結果となった。
- 6)断熱温度上昇試験の結果では、BB に FA を 20%置換することによって、約 17℃の温度上昇量の抑制 効果が認められ、マスコンクリート等の温度応力が大きい部材での温度ひび割れ効果が期待できる。

-第3章の参考文献-

- 1) 小野聖久,大城壮司,桐山昭吾: 温度履歴を受けた高炉セメントコンクリートの諸性状,コンクリート工学年次論文集,Vol.28,No.1,pp.197-202,2006.7
- 2) 日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2015
- 3) 和田真平,阿部道彦,柳啓,藤田克己: フライアッシュコンクリートの中性化,水密性および遮塩性に関する実験,コンクリート工学年次論文報告集 20(2),pp.121-126,1998.6
- 4) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説(2016),pp.98-126
- 5) 宮澤伸吾,黒井登起雄,川合雅弘: コンクリートの自己収縮に及ぼすセメントの種類の影響,コンクリート工学年次論文集,24(1),pp.429-434,2002.6

第4章

低炭素型高強度コンクリートの長期強度性状の改善

第4章 低炭素型高強度コンクリートの長期強度性状の改善

4.1 はじめに

本章では、第3章で抽出された高炉セメントB種にフライアッシュを置換した低炭素型高強度コンクリートの大きな課題といえる高温履歴をうけることで長期強度が停滞する現象について、4.2節でそのメカニズムの解明に向けていくつかのシリーズに分けて検討した。4.2.1項では養生方法の影響として、温度履歴による影響と水分の供給による影響について支配的な要因をする。4.2.2項では、結合材種類と粗骨材種類の組合せの影響として、結合材と粗骨材の組み合わせによる高温履歴による強度低下の程度を把握する。

そして、それらの検討結果を踏まえて 4.2.3 項では、モルタルと骨材がそれぞれ実際に高温履歴条件下でどのようなひずみ挙動を示しているかを、実験的に把握できるような試験方法について検討し、4.3 節で示す実用化にあたっての改善手法に関する提案と関連づけた.

4. 2 低炭素型高強度コンクリートの長期強度停滞メカニズムの検討

4. 2. 1 養生方法の影響

本項では、標準水中養生と簡易断熱養生や模擬柱コアとの間で生じる強度差は、①温度履歴による影響と②水分の供給による影響が複合的に作用しているものと仮定して、その影響度を確認するための検討を行った.

(1) 実験概要

実験の要因と水準を表 4-2-1 に示す. 検討内容は, 簡易断熱養生や模擬柱コアと同様の温度履歴を作用させた状態で, 水分の供給が有るケースと無いケースでの強度結果の比較を行った.

要因	水準
養生条件	標準養生
	温度履歴再現-封緘養生
	温度履歴再現-水中養生
コンクリート調合	BB: FA=8:2 W/B=24%
	BB: FA=8:2 W/B=40%

表 4-2-1 実験の要因と水準

(2) 使用材料および調合

使用材料は,3.4節の実機実験で材料と同様である.調合も3.4節と同様で,FA置換率を20%,W/Bを24%と40%の2水準とした.

(3) 試験項目

試験は、各種養生の圧縮強度試験を実施した. 材齢は、7、28、91 日とした. 簡易断熱養生や模擬柱の温度履歴を再現するために設定した温度条件を図 4-2-1 に示す。温度履歴再現にあたっては、コンクリートを型枠へ打設した後、温度制御槽内に静置し、20℃から80℃まで2.5℃/hの速度で昇温させ、80℃に達した後は0.8℃/hの速度で20℃まで降温し、その後、所定の材齢まで20℃で保持した.

温度履歴再現時の養生に関しては、封緘養生ケース、水中養生ケースともに 24 h 経過までは型枠のまま封緘養生とし、その後水中養生のケースのみを脱型し、同じ温度制御槽内で水中に浸漬した.

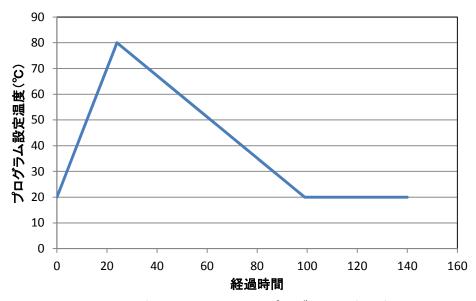


図 4-2-1 温度履歴再現のためのプログラム設定温度履歴

(4) 結果および考察

a)温度

温度制御槽の雰囲気,水中養生用水および供試体の温度履歴の測定結果を図 4-2-2 に示す.雰囲気温度 および型枠封緘状態供試体内部温度は概ね設定温度と同様の温度履歴で推移したが,養生水の温度は少 し遅れて上昇したため 80℃ピーク時において 72℃までしか上昇せず,水中養生供試体の温度は,水中 浸漬直後に温度が低下し,降温時の実際の温度履歴は 72℃→20℃となった.

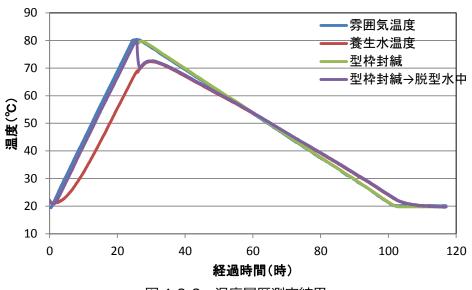


図 4-2-2 温度履歴測定結果

b)圧縮強度

圧縮強度の試験結果を表 4-2-2,図 4-2-3 に示す.標準養生では、材齢 91 日にかけて強度が増進しているのがわかるが、高温履歴を受けた場合には、封緘養生、水中養生ともに 7 日以降で強度が停滞していることが確認できる.また、3 章では、W/B が小さいほど、強度停滞の影響がより顕著であったが、今回のように同じ温度履歴を与えた場合には、W/B に関係なく強度増進が停滞していることが示された.このことから、模擬柱や簡易断熱養生供試体の長期強度が停滞する原因としては、水分供給の有無の影響に比べて、温度履歴の影響が支配的であると判断できる.

よって、これ以降で検討する高温履歴による強度停滞の対策として、水分の供給等に関する方法を本研究の範囲では考慮しないこととする。但し、今回実施した水分供給方法は外部からの水分供給であり、例えば加藤ら 1) による軽量骨材による内部養生が高強度コンクリートの内部組織形成に及ぼす影響についての検証結果が報告されるように、内側から水分供給があることで骨材界面領域に緻密な組織が形成され、自己収縮の抑制ならびに強度発現に寄与される可能性は十分にあり得るものと考える。

表 4-2-2 圧縮強度試験結果

材齢		W/B=40%		W/B=24%			
	描巻が中	20→80℃(封緘)	20→80℃(封緘)	描紙が中	20→80℃(封緘)	20→80℃(封緘)	
	標準水中	80→20℃(封緘)	80→20℃(水中)	標準水中	80→20℃(封緘)	80→20℃(水中)	
7	36.2	39.4	39.3	78.4	77.4	80.2	
28	53.9	39.7	40.1	104.8	78.7	84.5	
91	62.1	43.2	44.1	117.9	82.2	88.1	

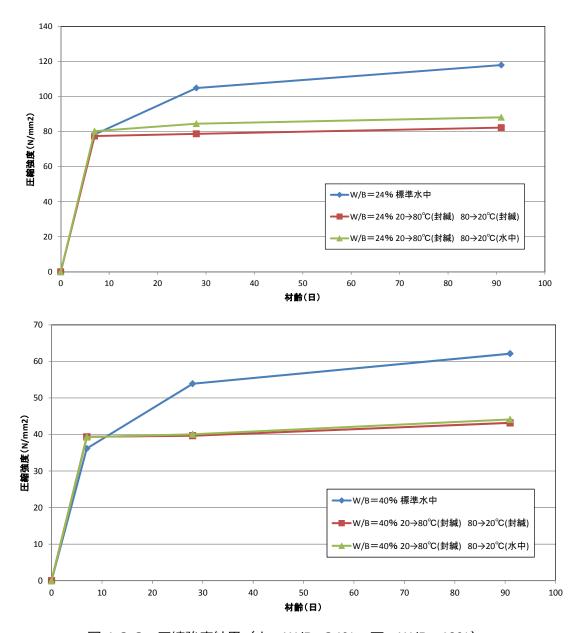


図 4-2-3 圧縮強度結果(上: W/B=24%,下: W/B=40%)

4. 2. 2 結合材種類と粗骨材種類の組合せの影響

本項では、3章で示された高温履歴による強度停滞現象が、特定の結合材と粗骨材の組み合わせで顕著に生じるものなのか、また Fc60N/mm² クラスまでの高強度コンクリートで一般的に使用される普通ポルトランドセメントや中庸熱ポルトランドセメントと比較してどの程度劣るのかを把握するため、いくつかの結合材と粗骨材の組み合わせをパラメーターとし、高温履歴が強度性状に及ぼす影響について実験により検討した。

(1) 使用材料

使用材料を表 4-2-3 に示す. 結合材として, BB, 普通ポルトランドセメント(以下, NC), 中庸熱ポルトランドセメント(以下, MC)を, 混和材には FA II 種を使用した. BB および FA は, 第3章の実機実験で使用したものと同じ生産地を使用した. 粗骨材には, 第3章の実機実験と同じ産地の石灰岩砕石(以下, LG)と硬質砂岩砕石(以下, SG)を使用した.

表 4-2-3 使用材料

材料	記号	仕様・物性				
水	W	上水道水				
	ВВ	高炉セメント Β 種,ρ=3.04 g/cm³				
セメント	NC	普通ポルトランドセメント,ρ=3.15 g/cm³				
	MC	中庸熱ポルトランドセメント, ρ=3.21 g/cm ³				
混和材	FA	フライアッシュ II 種,ρ=2.28 g/cm ³				
細骨材	S	山砂, ds=2.57 g/cm³				
粗骨材	SG	硬質砂岩砕石(栃木県産), ds=2.57 g/cm³				
加目初	LG	石灰岩砕石(高知県吾川産), ds=2.71 g/cm³				
混和剤	SP	高性能 A E 減水剤				

(2) コンクリートの調合

コンクリートの調合を表 4-2-4 に示す. 水結合材比は W/B=24%の 1 水準とし,表 4-2-4 に示す 8 調合のコンクリートを製造し,試験に用いた.

調合名	W/B	s/a		単位量(kg/m³)					
间口石	(%)	(%)	W	С	FΑ	S	SG	LG1	LG2
BB-LG			170	708	_	627	_	902	_
BB-SG			170	708	_	627	882	_	_
BB:FA20-LG			170	708	142	610	_	878	_
BB:FA20-SG	24	24 42.3	170	708	142	610	858	-	_
NC-LG	24		170	708	_	636	_	915	_
NC-SG			170	708	_	636	894	_	_
MC-LG			170	708	_	641	_	922	_
MC-SG			170	708	_	641	902	_	_

表 4-2-4 コンクリートの調合

(3) 試験項目・方法

試験項目および準拠した試験方法を表 4-2-5 に示す. 高温履歴の影響は簡易断熱養生と標準養生の供 試体をそれぞれ圧縮強度試験,割裂引張強度試験を実施することで検討することとした. 線膨張係数は, 各調合で製造したコンクリートから粗骨材を取り除いたモルタル供試体を別途作製し,JCI マスコンひび 割れ制御指針²⁾ で示される方法を参考に測定した. 粗骨材の線膨張係数は,写真 4-2-1 に示すように, 実際に使用した粗骨材を対象に,写真 4-2-2 に示すように平滑な面を削り出して,写真 4-2-3 と写真 4-2-4 の手順でひずみゲージおよび熱電対を設置・被覆し,モルタルと同じ温度条件を与えて測定した.

表 4-2-5 試験項目および準拠した試験方法

試験項目	試験方法
簡易断熱試験	JASS 5T-606
圧縮強度試験	JIS A 1108
割裂引張強度試験	JIS A 1113
線膨張係数試験	JCI ひび割れ制御指針 2008 ²⁾

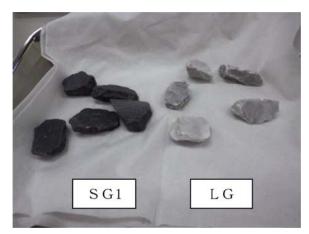


写真 4-2-1 線膨張係数の測定に供した粗骨材試料

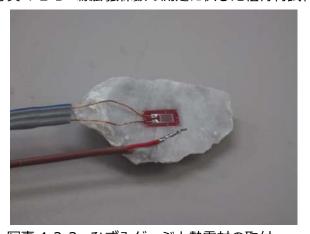


写真 4-2-3 ひずみゲージと熱電対の取付

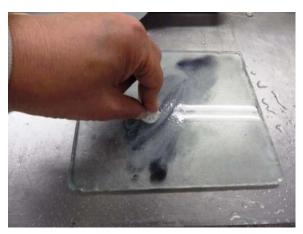


写真 4-2-2 粗骨材の面だし



写真 4-2-4 ひずみゲージと熱電対の被覆

(4) 試験結果および考察

表 4-2-6, 図 4-2-4 に材齢 28 日における標準養生と簡易断熱養生の圧縮強度試験の結果を示す. 標準養生と簡易断熱養生の強度差が最も大きいのは, BB-LG で 19.6%, 次いで BB:FA20-LG で 16.1%であった. 最も小さいのは MC-SG で 3.5%となった. いずれの結合材種類においても, 粗骨材に硬質砂岩砕石 (SG) を使用した組合せのほうが, 石灰石砕石 (LG) を使用した組合せよりも強度差は小さくなる傾向が認められた.

表 4-2-7, 図 4-2-5 に材齢 28 日における標準養生と簡易断熱養生の割裂引張強度の結果を示す. 標準養生と簡易断熱養生の強度差が最も大きいのは, BB-LG で 23.2%, 次いで BB:FA20-LG で 16.1%であった. 最も小さいのは MC-SG で 3.1%となった. いずれの結合材種類においても, 粗骨材に硬質砂岩砕石 (SG) を使用した組合せのほうが, 石灰石砕石 (LG) を使用した組合せよりも強度差は小さくなる傾向が認められた.

これらの結果から分かるように、圧縮強度と割裂強度結果には同様の傾向が認められたが、粗骨材の 影響による強度差については割裂引張強度のほうがより顕著に SG が小さい傾向である.

表 4-2-8, 図 4-2-6 には,ウェットスクリーニングにより粗骨材を除いたモルタル試験体による材齢 28 日における標準養生と簡易断熱養生の割裂引張強度の結果を示す.いずれの結合材の組合せにおいて もコンクリート供試体でみられたような標準養生と簡易断熱養生の強度差は確認されず,BB:FA20 や MC では簡易断熱養生の強度が若干大きくなる結果であった.

以上より、これらの結果は、本検討範囲の高強度領域においては、温度履歴を受けることで強度増進 が停滞する現象は、粗骨材の影響が支配的である可能性が高いことを示唆するものである.

表 4-2-6 圧縮強度結果(材齢 28 日)

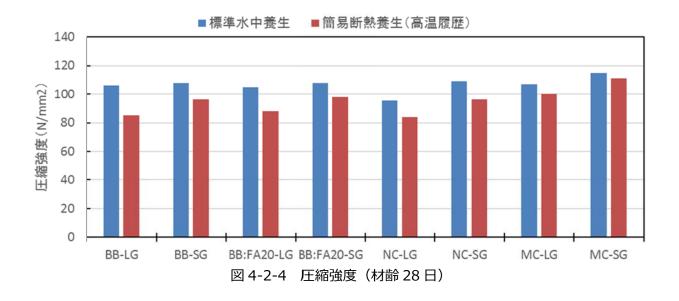
種類	圧縮強	強度差	
性织	標準養生	簡易断熱養生	(%)
BB-LG	106.0	85.2	19.6
BB-SG	108.0	96.1	11.0
BB:FA20-LG	105.0	88.1	16.1
BB:FA20-SG	108.0	98.0	9.3
NC-LG	95.4	83.9	12.1
NC-SG	109.0	96.4	11.6
MC-LG	107.0	100.0	6.5
MC-SG	115.0	111.0	3.5

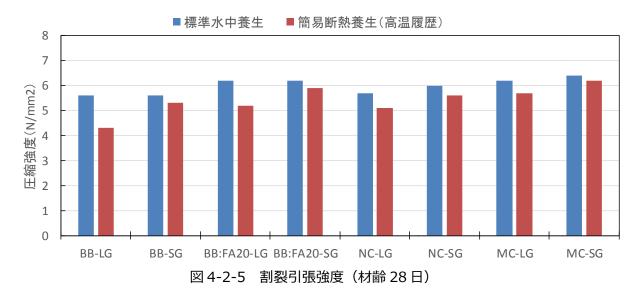
表 4-2-7 割裂引張強度結果(材齢 28 日)

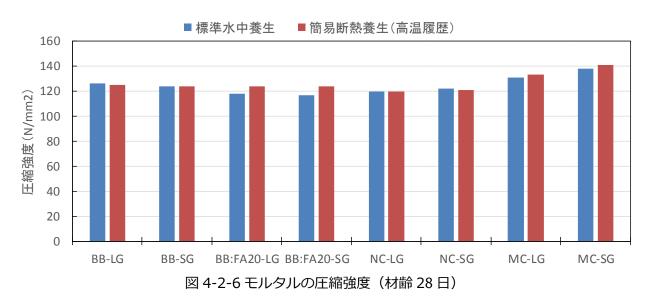
千玉米 石	割裂引張	強度差	
種類	標準養生	簡易断熱養生	(%)
BB-LG	5.6	4.3	23.2
BB-SG	5.6	5.3	5.4
BB:FA20-LG	6.2	5.2	16.1
BB:FA20-SG	6.2	5.9	4.8
NC-LG	5.7	5.1	10.5
NC-SG	6.0	5.6	6.7
MC-LG	6.2	5.7	8.1
MC-SG	6.4	6.2	3.1

表 4-2-8 モルタルの圧縮強度(材齢 28 日)

種類	圧縮強	強度差	
但規	標準養生	簡易断熱養生	(%)
BB-LG	126.0	125.0	0.8
BB-SG	124.0	124.0	0.0
BB:FA20-LG	118.0	124.0	-5.1
BB:FA20-SG	117.0	124.0	-6.0
NC-LG	120.0	120.0	0.0
NC-SG	122.0	121.0	0.8
MC-LG	131.0	133.0	-1.5
MC-SG	138.0	141.0	-2.2







本検討と並行して検討された宮原ら³⁾ の報告により同様の検討を実施した結果が示されているが、傾向は同じであった。同報告では、高温履歴を受けたコンクリートについて、粗骨材界面を中心とした断面の観察結果を行っており、その観察結果を写真 4-2-5~4-2-7 に示す。

BB-24%-LGおよび BB:FA=80:20-24%-LG においてコンクリート中の粗骨材とモルタルの界面にて写真 4-2-5, 4-2-6 に示すような剥離が多数発生していた. 一方、粗骨材に硬質砂岩砕石を使用した場合には、このような剥離は生じていなかった。

表 4-2-9 に各結合材のモルタルおよび粗骨材の線膨張係数測定結果を示す。モルタルの線膨張係数は、BB が 14.7×10^{-6} /℃、BB:FA20 が 12.6×10^{-6} /℃、NC が 12.1×10^{-6} /℃、BB が 10.5×10^{-6} /℃であった。一方、粗骨材は、LG が 2.4×10^{-6} /℃、SG が 6.8×10^{-6} /℃であった。

モルタルと粗骨材の線膨張係数の差に着目すると、BB と LG で $12.3\times10^{-6}/\mathbb{C}$ 、BB と SG で $7.9\times10^{-6}/\mathbb{C}$ 、BB:FA=80:20 と LG で $10.2\times10^{-6}/\mathbb{C}$ 、BB:FA=80:20 と SG で $5.8\times10^{-6}/\mathbb{C}$ となり、LG を使用した場合、モルタルと粗骨材間で極めて大きな線膨張係数の差があることが確認された.

これらの結果より、BFS と LG を併用した W/B=24%のコンクリートにおいて、高温履歴を受けた場合に標準養生に比べて強度低下が大きくなったのは、BFS を使用したモルタルが線膨張係数が大きくなることと LG のように線膨張係数が小さい粗骨材を組合わせたときの線膨張係数差がもたらす温度上昇下降時のひずみの差、更には、そのひずみ差に起因した粗骨材界面の剥離が原因であることが推察できる。また、フライアッシュを使用した 3 成分混合セメントの場合では、当該モルタルの線膨張係数が若干小さくなるため、高温履歴を受けた場合の強度低下が緩和される結果となっていることが確認できた。

表 4-2-9 各結合材および粗骨材の線膨張係数測定結果

	種類	線膨張係数(×10 ⁻⁶ /℃)
モルタル	ВВ	14.7
	BB:FA20	12.6
	NC	12.1
	MC	10.5
粗骨材	LG	2.4
	SG	6.8

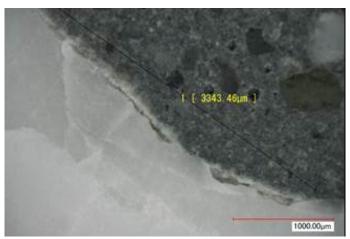


写真 4-2-5 BB と LG 界面の観察 ³⁾



写真 4-2-6 BB: FA20 と LG 界面の観察 ³⁾



写真 4-2-7 BB と SG 界面の観察 ³⁾

4. 2. 3 温度降下時のモルタルと粗骨材のひずみ差の影響

本項では,高温履歴条件下でのモルタルと粗骨材のひずみ挙動の違いを把握するため,それぞれのひずみを測定することで実際にコンクリートの中で起きている挙動差を検証する.

(1) 試験水準

表 4-2-10 に示す 8 水準のモルタルと粗骨材の組み合わせによるひずみ測定を行う. 結合材は,NC,BB,BB: FA20 の 3 水準とし、粗骨材は LG と SG の 2 水準とした.

表 4-2-10 試験水準と測定数など

		モルタル	*	且骨材
		ひずみ		
No.	記号	測定数	/左生 米左	粗骨材の
		(供試体数	作製数	種類
		φ50×100mm)		
1	NC-LG	3	6	LG:石灰石
2	NC-SG	3	6	SG:硬質砂岩
3	BB-LG	3	6	LG:石灰石
4	BB-SG	3	6	SG:硬質砂岩
(5)	BB:FA20-LG	3	6	LG:石灰石
6	BB:FA20-SG	3	6	SG:硬質砂岩

(2) モルタルの使用材料と配合条件

使用材料は4.2.2 項で用いたものと同様である。モルタルは、コンクリート中の粗骨材を除いたものとし、表4-2-11 に示すように、粗骨材を除いた比率の配合で製造した。なお、モルタルの線膨張係数は、空気量によって変化することも考えられるため、コンクリート中の空気量に相当する空気量をモルタルに連行した。

試験ケース	W/	目標		単 位 量 (kg/m³)					和剤 FA) ×%		
調合 の種類	(B+FA) (%)	空気量 (%)	W	В	FA	S1	S2	LG	SG	高性能 AE減水 剤	消泡剤, (収縮低減 材)
①, ② NC-24%	24	1.6	251	N 1046	0	604	402	_	_	1.65	0.001
③, ④ BB-24%	24	1.2	251	BB 1046	0	585	390	ı	ı	1. 75	0.001
⑤, ⑥ BB:FA = 80:20-24%	24	1.4	251	BB 836	210	551	366	ı	-	1.4	0.001

表 4-2-11 モルタルの基本調合

(3) 供試体の作製方法

モルタルの練混ぜには,写真 4-2-8 に示すモルタルミキサを使用した. 予め練混ぜ状況を確認して,使用するミキサの種類と練混ぜが可能な手順を定めた. 練混ぜ手順は以下のとおりある.

[練混ぜ手順]

結合材+細骨材投入→空練り30秒→水(混和剤+水)投入→練混ぜ120秒

なお,空気量は,JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法 – 空気室圧力方法」によって測定した.

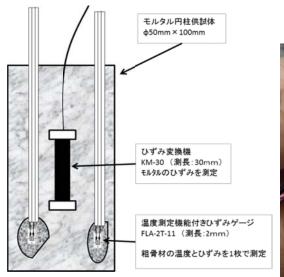
注)練混ぜ直後のモルタル中の空気量の範囲を 1.0~4.0%程度とする



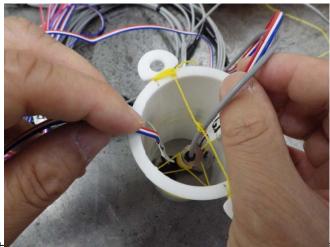


写真 4-2-8 モルタルミキサ(練混ぜ可能量約5ℓ)と練混ぜたモルタルの状況例

モルタルと粗骨材のひずみを測定する方法を図 4-2-7 に示す. 供試体の寸法をφ50mm×100mm とし, モルタルと粗骨材の体積比が 5:1 程度となる様に, ひずみゲージを貼り付けた粗骨材 2 個を埋め込む. また, モルタルのひずみを測定するために, 供試体中央にひずみ変換機 KM-30 (測点距離 30mm)を取り付ける (写真 4-2-9). なお, モルタルと粗骨材は, 等方性を有していると判断できるため, 1 軸方向のひずみを測定する.



った.



粗骨材に貼り付けたれずみゲージは、水分十 及人し、10月9分と 内間が 3 日本度 履歴 を 図 4-2-7 モルタルと粗骨材のひずみ測 1環 写真 4-2-9 ひずみ変換器の取り付け状況 ることが多い. このため、1 世外あたり 3 本の供試体(粗骨材のひずみ測定測定 6 個)あたり、最多で 12 個のひずみゲージを貼付した粗骨材を準備する. これらを、約 24 時間、水中に浸漬して破損の有無を事前に確認したうえでゲージの破損が認められなかった内の 6 個を試験に供した. なお、ゲージのシール方法のイメージを図 4-2-8 に示す. 準備段階においては、事前確認でゲージの破損はほとんど認められなか

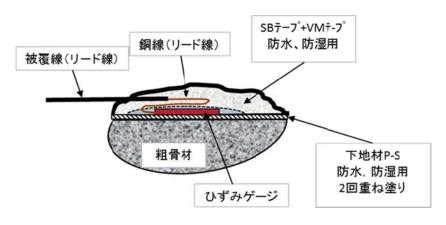


図 4-2-8 シールのイメージ







写真 4-2-11 供試体の作製状況

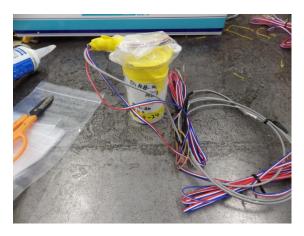


写真 4-2-12 供試体の封緘方法

(4) 温度履歴

供試体の作用する温度履歴を図 4-2-9 に示す. 供試体へモルタルを打込んだ後, 20℃にて 48 時間の封 緘養生を行う. 48 時間から高温履歴を作用させ,供試体の乾燥や,水分の供給が無いように,十分にシ ールして,封緘養生を行う. なお,型枠には剛性が小さいプラスチック製簡易型枠(プラモールド)を 用いる. このため,型枠ごと,ポリエチレン製袋へ入れ,封緘養生を行った.

なお、供試体作製後 48 時間から温度上昇を開始するが、供試体を移動させても支障がない 24 時間までに、供試体を封緘してセンサーを記録器へ繋いだ。その間、概ね 20 \mathbb{C} の恒温室に保管し、約 24 時間から 20 \mathbb{C} に設定した温度制御槽へ入れ、温度、モルタルのひずみ、粗骨材のひずみの測定を開始した。すなわち、材齢 24 時間~48 時間の間では、20 \mathbb{C} 一定温度におけるひずみの変化を測定した。測定状況を写真 4-2-13 に示す。

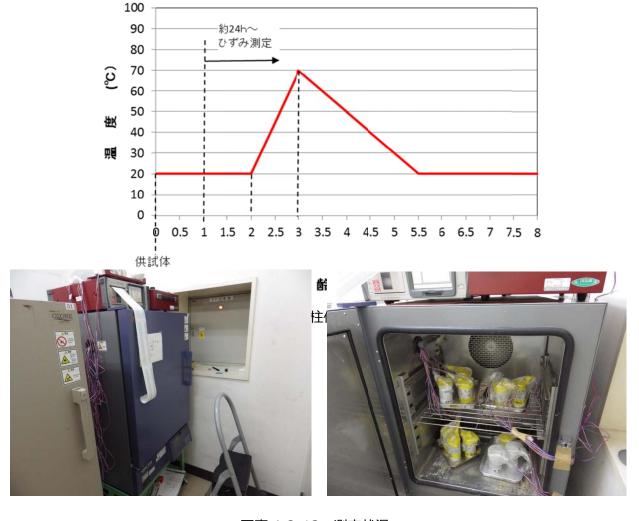


写真 4-2-13 測定状況

(5) モルタルの練混ぜ結果

モルタルの練混ぜ結果を表 4-2-12 に示す. いずれも, 細骨材が沈降するなどの材料分離は認められなかった. また, いずれも材令 17 時間以内で十分に硬化していることが確認されることから, 混和剤による凝結遅延も生じておらず, 適切な使用量であったと判断できる.

表 4-2-12 モルタルの練混ぜ結果

試験ケース 調合	練混ぜ直後 の温度	空気量	備考
の種類	(℃)	(%)	
①, ② NC-24%	23. 3	2. 7	材齢 17 時間以内で, 十分に硬化
③, ④ BB-24%	24. 5	1.1	材齢 17 時間以内で, 十分に硬化
⑤, ⑥ BB:FA20-24%	22. 6	1.3	材齢 17 時間以内で, 十分に硬化

(6) モルタル及び粗骨材のひずみ測定結果

ひずみ測定結果を図 4-2-10 に示す. 結合材種類によって硬化初期のひずみ挙動に差がみられ, BB および BB:FA20 では, NC に比べて自己収縮に伴う収縮ひずみが大きいことが確認できる. この自己収縮は, 温度履歴作用後にも継続的に影響しているものと考えられ, 温度降下時には線膨張係数による収縮ひずみに自己収縮ひずみが加わったひずみ挙動を示しているものと推測できる.

前項で示したモルタルと粗骨材のひずみ差による剥離現象は、収縮応力が発生する温度降下時に生じているという過程のもと、図 4-2-11 に最高ひずみ到達時点を原点にとることで温度降下時からのひずみ挙動を示した。その結果、それぞれのひずみ差に差がみられ、LG よりも SG のほうが全体的にひずみ差が小さくなっている。結合材種類においても NC が最もひずみ差が小さく、次いで BB:FA20 となり、BB が最も大きいひずみ差を示した。これらの順序は前項で示した圧縮強度および引張強度の高温履歴による強度差と整合しており、降温時のモルタルと粗骨材のひずみ差を把握することで、高温履歴を受けたコンクリートの長期強度停滞現象の程度を推定することができる可能性があることを裏付ける結果といえる。

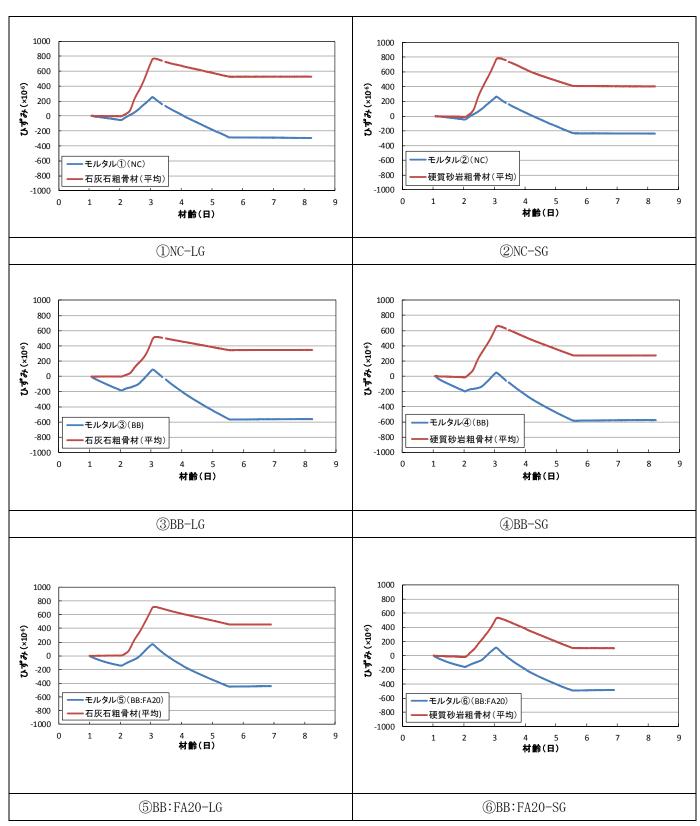


図 4-2-10 モルタル, 粗骨材のひずみ測定結果

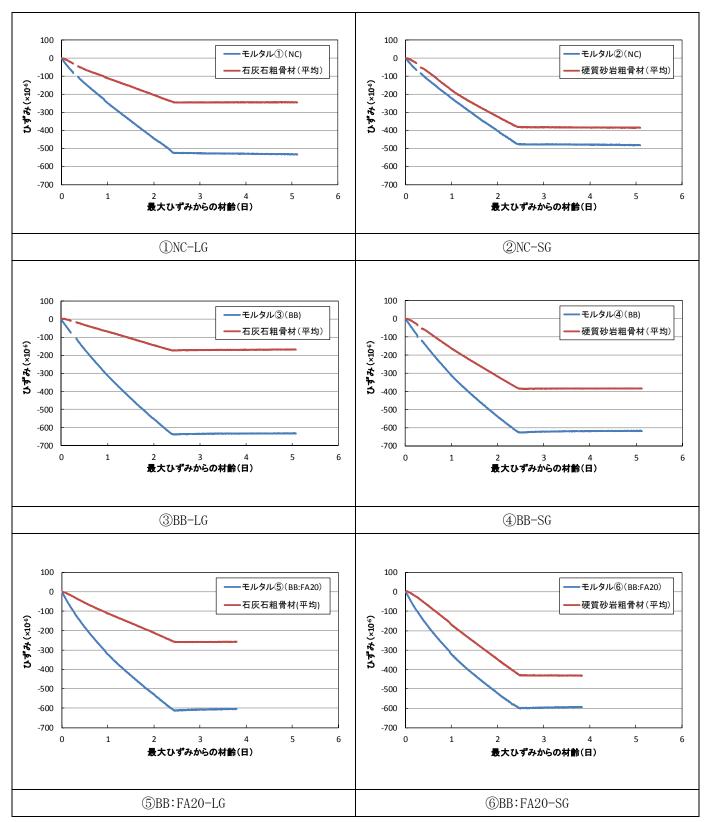


図 4-2-11 モルタル,粗骨材の降温時のひずみ測定結果

4.3 低炭素型高強度コンクリートの長期強度改善手法の提案

前項までの検討により、高温履歴による長期強度停滞は、モルタルと粗骨材のひずみ差にともなう骨材界面の剥離現象による影響が支配的であることを示し、モルタルと粗骨材それぞれの温度降下時からのひずみ挙動に着目することで、高温履歴による長期強度停滞の程度を判断することができることを示した。つまり、ひずみ差を小さくする方法を適用することで、長期強度停滞現象を抑制できるものと推察できる。

本節においては、ひずみ差を小さくすることに寄与できる可能性が高い以下の 4 つの方法を、低炭素型高強度コンクリートの構造体補正強度(S値)改善対策として提案し、その改善効果について確認した.

- ①線膨張係数が大きい粗骨材の選定
- ②収縮低減剤の使用
- ③温度降下時の収縮挙動時に膨張が継続する膨張材の使用
- ④水和熱抑制効果のある材(剤)の使用

(1) 確認試験概要

上記で提案した4つの方法によるS値改善効果を確認するため,表4-3-1に示す4種類の供試体を作製し,標準養生28日と簡易断熱養生91日の強度試験を実施する.全てのベースとなるBB-LGは4.2.2項で使用した材料および調合とした.対策として新たに使用した材料を表4-3-2に示す.

表 4-3-1 実験条件

記号	調合条件	備考
BB-LG	4.2.2 項と同様の使用材料および調合	無対策
BB-SG	4.2.2 項と同様の使用材料および調合	対策①:粗骨材の選定
BB-LG2	線膨張係数が比較的大きい LG を使用	対策①:粗骨材の選定
BB-LG-Sr	収縮低減剤添加 C×4%	対策②:収縮低減剤の使用
BB-LG-EXR	膨張剤タイプ R 20kg/m ³	対策③, ④:膨張剤の使用および水和熱抑制

表 4-3-2 使用材料

材料	記号	仕様・物性
粗骨材	LG2	石灰岩砕石 (栃木県唐沢産), 線膨張係数 5.6 (×10 ⁻⁶ /℃)
位 目 初	租目的 LG2	ds=2.71 g/cm ³
収縮低減剤	Sr	ポリエーテル誘導系
膨張剤	ExR	エトリンガイトー石灰複合系 (タイプ R:水和熱抑制型)

(2) 試験結果

標準養生 28 日と簡易断熱養生 91 日の比較により S 値を推定した結果を表 4-3-3 に示す.

標準養生 28 日強度が同程度でかつ効果的に S 値を改善できるのは、粗骨材の選定であり、LG から SG にすることで 6.4N/mm² の改善効果が得られた. また、同じ LG でも線膨張係数が大きいものであれば、5.2N/mm² の改善効果が認められた. また、膨張剤タイプ R の使用では 4.5N/mm² の改善効果が認められた. 今回の結果では、収縮低減剤については、添加量が多すぎたためか標準養生の強度低下を起こしてしまったことから改善効果を確認することができなかった.

表 4-3-3 標準養生 28 日と簡易断熱養生 91 日の圧縮強度および S値

種類	圧縮強	₂₈ S ₉₁	
性块	標準養生 28 日	簡易断熱養生91日	(N/mm2)
無体策(BB-LG)	103.6	88.2	15.4
①粗骨材 BB-SG	103.2	94.2	9.0
①粗骨材 BB-LG2	1007	00.5	100
(線膨張係数が比較的大きいLG)	102.7	92.5	10.2
②収縮低減剤の使用(C×4%)	86.7	87.9	-1.2
③膨張材タイプRの使用	100.1	89.2	10.9

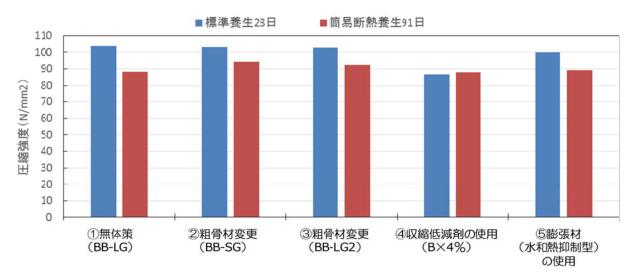


図 4-3-1 標準養生 28 日と簡易断熱養生 91 日の圧縮強度

4.4 まとめ

本章では、第3章で抽出された高炉セメントB種にフライアッシュを置換した低炭素型高強度コンクリートの大きな課題といえる高温履歴をうけることで長期強度が停滞する現象について、そのメカニズムの解明に向けていくつかのシリーズに分けて検討した。さらに、検討した結果からモルタルと粗骨材の線膨張係数差によるひずみ差が主な要因となることを示し、それらを根拠にいくつかの有効な対策を提案し、S値改善効果を確認した。

本章の検討で得られた知見をまとめると以下のようになる.

- 1) 水分の供給の影響を確認するために行った養生違いが強度におよぼす影響を検討した結果,模擬柱や 簡易断熱養生供試体の長期強度が停滞する原因としては,水分供給の有無の影響に比べて,温度履歴 の影響が支配的であると判断できる.
- 2) 高炉スラグ微粉末,石灰砕石を併用した高強度コンクリートにおいて,高温履歴を受けた場合に標準養生に比べて強度低下が大きくなったのは,高炉スラグ微粉末(もしくは高炉セメント)を使用したモルタルと石灰砕石の線膨張係数の差がもたらす温度上昇下降時のひずみの差,更には,そのひずみ差に起因した粗骨材界面の剥離が原因であることが示唆された。また,フライアッシュを使用した3成分混合セメントの場合では,当該モルタルの線膨張係数が若干小さくなるため,高温履歴を受けた場合の強度低下が緩和される結果となっているものと推察できる.
- 3) モルタルと粗骨材のひずみ差による剥離現象は、収縮応力が発生する温度降下時に生じているという 過程のもと、モルタルと粗骨材のひずみ挙動を測定することでその程度を判断可能である.
- 4) 長期強度停滞の改善方法として下記の4つの方法が有効であることを提案し,それらが実際にどの程度のS値改善効果が期待できるかを示した.
 - ①線膨張係数が大きい粗骨材の選定
 - ②収縮低減剤の使用
 - ③温度降下時の収縮挙動時に膨張が継続する膨張材の使用
 - ④水和熱抑制効果のある材(剤)の使用

実際には、レディーミクストコンクリート工場の設備の制約などを考慮すると適用できる対策は限られる. 費用対効果を考慮したうえで、場合によっては S 値を大きく設定するほうが経済的になることがあることも留意して総合的視点から決定することが求められる.

-第4章の参考文献-

- 1) 加籐 俊充, 五十嵐 心一, 川村 満紀: 軽量骨材による内部養生が高強度コンクリートの内部組織 形成に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, 2004
- 2) 日本コンクリート工学会:マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008
- 3) 宮原 健太, 小田部 裕一, 鈴木 好幸, 石川 伸介:高温履歴を受けた高炉スラグ混合高強度コンクリートの強度性状, セメント・コンクリート論文集, 平成 28 年 3 月

第5章

建築物の建設に伴う CO2 排出量評価手法の提案

第5章 建築物の建設に伴う CO₂ 排出量評価手法の提案

5. 1 はじめに

建設分野は、エネルギーの消費量および CO2排出量が大きい産業であり、エネルギー消費量は、世界全体における年間エネルギー消費量の 40%であるとの報告がある ¹⁾. 建築関連に限っても、住宅及び業務ビル用の資機材製造・建設・改修・運用・廃棄までのライフサイクルを通じての CO2排出量は、我が国全体の 3 分の 1 を占めると推計されている ²⁾. このことより、サステナブルな低炭素型の社会を実現するためには、建築界の果たす役割は非常に大きい.

建築物の低炭素化を図るうえで重要なのは、ライフサイクルの各段階における CO2排出量の割合を把握し、効率的な方策を検討し実施することである。建築物の各段階の CO2排出量は、運用段階の割合が高いことが知られており、2000 年時点の試算では7割以上を占めるとの報告がある³⁾. そのため、近年までの建築分野における低炭素化に向けた取組みは、運用段階に係わる省工ネ化や再生可能エネルギーの効果的な利用に重きが置かれてきた。また、運用段階の低炭素化は、運用コストの削減に繋がり、建築物の発注者への直接的なメリットとなるため、設計段階から LCA 評価を行い、受注者側から技術提案として積極的に検討するケースも増加してきている。

さらに、日本の CO2削減目標を受けて、経済産業省では 2030 年までに新築全体での ZEB (ネット・ゼロ・エネルギー・ビル) の実現を目標に掲げており、運用段階における省エネや再生可能エネルギーの利用による低炭素化技術の開発がよりいっそう加速していくと思われる。そうした中で、運用段階以外における CO2排出量(以下、建設に伴う CO2排出量) の割合は相対的に大きくなっていくことが想定され、建設に伴う CO2排出量の削減も無視できない項目となることが必至であると考える。

しかしながら,低炭素型の材料や工法といった要素的な技術開発は進む中で,それらが実際に建築物の建設に伴う CO2排出量のうち,どの程度の削減効果であるかを評価する試みはされているが,一般的な方法がないのが現状である.

そこで本章では、建築物の建設に伴う CO2排出量を、第三者検証による信頼性、透明性に着目し、一般社団法人産業環境管理協会(以下、JEMAI)によって運用されているカーボンフットプリントコミュニケーションプログラム(以下、CFP プログラム⁴⁾)により評価した結果を報告する。

5. 2 カーボンフットプリントを活用した建築物の CO₂ 排出量評価手法

5. 2. 1 CFP プログラムの概要

カーボンフットプリント(以下, CFP)とは、原材料の調達から廃棄・リサイクルに至るまでの商品・サービスのライフサイクル全体を通して排出される温室効果ガスの排出量を CO2に換算した数値のことで、この数値を「見える化」し、商品・サービスに分かりやすく表示する仕組みが CFP プログラムである.

その概念は、製品の製造・使用・廃棄に伴う CO2排出量を「見える化」することで、事業者、消費者 双方の CO2排出に対する自覚を促し、CO2削減の判断基準とすることを目的としたものである. 2009 年に経済産業省等の主導で開始された「CFP 制度試行事業」により制度プログラムが構築され、2012 年度から JEMAI が引き継ぎ、本格的な運用が開始された. 現在では、図 5-2-1 に示すような CFP プログラム参加マーク(以下、CFP マーク)が採用されている.



図 5-2-1 CFP マーク

5. 2. 2 建築物の CFP 算定・表示方法

CFP プログラムによる CFP の算定・表示の流れを図 5-2-2 に示す. 建築物を対象に CFP を算定・表示するには、まず、算定に関するルールとなる「CFP 製品種別基準(CFP-PCR: Carbon footprint of a Product- Product Category Rule)」(以下、CFP-PCR)を策定し、一般意見公募を経た後、専門レビューアによるレビューおよびレビューパネルの認定を受けて、公開することが必要となる.

次に、該当する CFP-PCR に基づいて CFP を算定し、算定結果について第三者検証を受け、レビューパネルによる合否判定を経て、登録・公開することで、建築物の CFP 算定結果を表示することができる。 算定結果の表示は、JEMAI の CFP プログラムの HP 上で登録情報として公開 ⁵⁾されるほか、CFP マークを対象製品等に付与する方法等が用いられている。



※CFP プログラムにより設置運営される CFP-PCR の認定に関する最終判断および CFP 検証結果に対する確認・最終判定を行う機関

図 5-2-2 CFP プログラムによる CFP の算定・表示の流れ

5. 2. 3 モデル建築物による CFP 算定

(1) CFP-PCR の作成

建築物の CFP 算定を実施するため、一般的な RC 造建築物を想定して、CFP-PCR を作成した. 作成は、CFP プログラムにおいて規定されている「CFP 製品種別基準(CFP-PCR)に関する要求事項」に準拠した。

建築物を対象とした CFP-PCR の概要を表 5-2-1 に, ライフサイクルフローを図 5-2-3 に示す. 本 CFP-PCR は, 建設に伴う CO2排出量を評価することを目的としているため, 運用段階を算定の対象外としている. なお, 登録・公開された CFP-PCR の詳細は CFP プログラムの HP 上で公開されている 6).

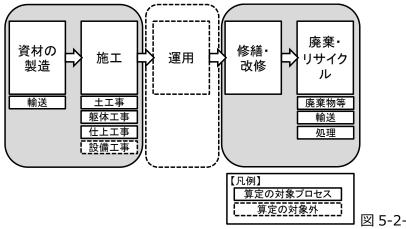


図 5-2-3 ライフサイクルフロー

表 5-2-1 建築物を対象とした CFP-PCR の概要

	及 J-Z-1 産業物で対象とした CF-FCK の概要			
CFP-PCR 名称	建築物(躯体および仕上げ材)			
製品種別	建築物(躯体および仕上げ材)を対象とする.			
	ただし,現時点では主要な構造部を RC 造とした建築物に限る.			
算定単位	1棟・耐用年数あたり,または延べ床面積・耐用年数あたりとする.			
(機能単位)				
対象とする	次の要素を含むものとする.			
構成要素	・基礎,躯体,外装材,内装材および改修時に必要とする資材			
	ただし,次の要素は含まないものとする.			
	・ 建築物に設置される設備(設備は運用時と密接に詳細検討されるべきものであるため)			
	・外構			
引用規格および	次の規格を引用する.			
引用 CFP-PCR	・日本建築学会,「建物の LCA 指針-温暖化・資源消費・廃棄物対策のための評価ツール-(改訂版)」, (2013)			
	・公益社団法人ロングライフビル推進協会 BELCA,「LC 評価,長期修繕計画,診断,資産評価,ER のため			
	の建築物のライフサイクルマネジメント用データ集」, (2014)			
	・社団法人建築業協会環境委員会副産物部会, 「建築系混合廃棄物の原単位調査報告書」, (2004)			
	・社団法人建築業協会環境委員会副産物部会,「建築物の解体に伴う廃棄物の原単位調査報告書」,			
	(2004)			
製品システム(デ	次のライフサイクル段階を対象とする.			
ータの収集範囲)	・資材製造段階			
	・施工段階			
	・修繕・改修段階			
	・廃棄・リサイクル段階			
	※建築物運用段階は対象としない.			
カットオフ基準	・建築物を生産する設備(クレーン,現場事務所など)や投入物や廃棄物を輸送する輸送用機器(トラック			
およびカットオ	など)などの資本財の使用時以外の負荷			
フ対象	・生産工場などの建設に係る負荷			
	・複数年使用する資材(仮設,樹脂型枠など)の製造負荷および輸送負荷			
	・投入物を外部から調達する際に使用される容器包装や輸送資材の負荷			
	・副資材のうち,マスク,軍手等の汎用的なものの負荷			
	・事務部門や研究部門などの間接部門に係る負荷			
	・土地利用変化に係る負荷.ただし,森林であった土地を改変し建築する場合は,森林に固定されていた炭			
	素の排出はカットオフ対象としない.			
	・施工段階における施工現場に出入りする人の移動に係る負荷			
一次データの収	対象建築物の設計情報から物量データを収集する. ただし, 物量データの入手が難しい場合は金額データを			
集方法	収集してもよい.			
二次データの収	利用可能データライブラリ「建築物の LCA ツール ver.5.00 搭載 LCA データベース 【抜粋版】」のデー			
集方法	夕を優先的に用いる.			

(2) モデル建築物の概要

CFP 算定の対象としたモデル建築物の概要を図 5-2-4 に示す。モデル建築物は、一般的な RC 造建築物を想定し、地上 8 階・地下 1 階の中規模店舗ビルを設定した。建築物の耐用年数は 60 年とした。



【モデル建築物の概要】

用途:飲食店舗およびテナント

建物規模: 地上8階・地下1階

建築面積:358.8 ㎡

延床面積: 2595.4 ㎡

構造:鉄筋コンクリート造

架構形式: X方向耐震壁付ラーメン構造

Y方向純ラーメン構造

基礎形式: 杭基礎(場所打ちコンクリート杭)

耐用年数:60年

図 5-2-4 モデル建築物の概要



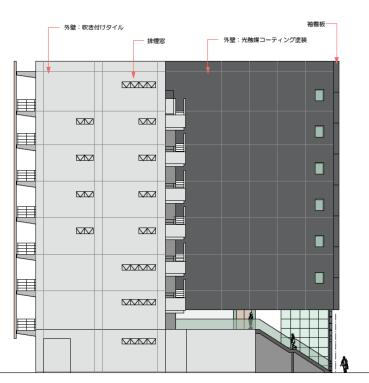


図 5-2-4 モデル建築物の概要(図面抜粋)

(3) CFP 算定方法

モデル建築物の CFP 算定方法は、作成した CFP-PCR に基づいて実施した. 算定に必要な材料種類やその資材数量といった一次データに関しては、設計情報に基づく積算データを用いた.

CO₂排出量の算定方法は、表 5-2-2 のように、ライフサイクルの段階ごとに設定したが、一次データの収集が困難な項目に関しては、別途 CFP-PCR に示すシナリオによる算定を行ってもよいこととした。 材料の原単位などの二次データに関しては、CFP プログラム利用可能データ ⁷⁾のうち、「建築物の LCAツール ver.5.00 搭載 LCA データベース 【抜粋版】」のデータを優先的に用いることとし、必要に応じてその他のデータベースを併用した。

表 5-2-2 CO₂排出量の算定

段階	活動量の項目	活動量に乗じる原単位の項目名
資材製 造	「建築資材(コンクリート、鉄筋、鉄骨、鉄板、防水用資材、断熱材、石材、木材、タイル、モルタル、建具、ガラス、その他の内装材、その他の外装材)」製品生産サイトへの投入量	「建築資材」製造および調達輸送原単位
	「燃料」「電力」施工プロセスへの投入量	「燃料」「電力」製造と供給および使用原 単位
施工	①「廃棄物等」「廃水」処理方法ごとの排出量②「廃棄物等」各処理施設への輸送量(または燃料使用量) ③「廃棄物等のうちの化石資源由来成分」焼却処理の量 ④「廃棄物等のうち有機物成分」埋立処理の量	①「各処理方法」処理原単位 ②「各輸送手段」輸送原単位 ③「各化石資源由来成分」燃焼原単位 ④「各有機物成分」嫌気性分解原単位
修繕・改 修	「建築資材」製品生産サイトへの投入量	「建築資材」製造および調達輸送原単位
	「建築物の延べ床面積」	「建築物の解体」原単位
廃棄・リ サイク ル	①「建設副産物」処理方法ごとの排出量 ②「建設副産物」各処理施設への輸送量(または 燃料使用量) ③「建設副産物のうち化石資源由来成分」焼却処 理の量 ④「建設副産物のうち有機物成分」埋立処理の量	①「各処理方法」原単位 ②「各輸送手段」原単位 ③「各化石資源由来成分焼却」原単位 ④「各有機物成分」嫌気性分解原単位

(3) CFP 算定結果および考察

廃棄・リサイクル段階

CFP 算定結果を表 5-2-3 に示す. また, 本算定結果の CFP プログラムによる表示例を図 5-2-5 に示す.

設定したモデル建築物に対する CFP 算定の結果, 耐用年数 60 年あたり 2,900 t-CO2の CO2排出量となった. ライフサイクル段階ごとでは, 資材製造段階における CO2排出量が 1,500 t-CO2と最も高い寄与率を示し, 次いで, 施工段階が 740 t-CO2, 修繕・改修段階が 620 t-CO2となった. 廃棄・リサイクル段階は 110 t-CO2とその他の段階に比べて低い寄与率となった.

CFP 算定結果(耐用年数 60 年あたり) t-CO2* CFP 算定結果 2,900 (端数処理のため内訳の合計値と異なる) (CFP) 内訳(ライフサイクル段階別) 資材製造段階 1,500 t-CO₂ 施工段階 740 t-CO₂ 修繕・改修段階 620 t-CO₂

表 5-2-3 CFP 算定結果 8)

※CFP の基本概念により、数値の単位は CO2以外の温室効果ガスの影響を CO2換算した t-CO2e で示されるが、本算定では CO2以外の温室効果ガスの排出は考慮していないため、t-CO2で示した.

t-CO₂

110

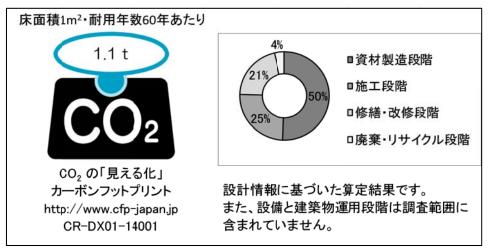


図 5-2-5 CFP プログラムによる数値表示の例

最も寄与率が高い資材製造段階について,工種ごとに分類し CO2寄与率の内訳を算定すると図 5-2-6 のようになる.工種ごとで比較すると,コンクリート工事の寄与率が 41%と最も高く,次いで,杭地業工事が 24%となった.本モデル建築物は,場所打ちコンクリート杭基礎のため,杭地業工事の中にもコンクリートが含まれており,資材製造段階の CO2排出量はコンクリートの影響が極めて大きいことがわかる.

これより、本モデル建築物においては、コンクリートの資材製造に係わる CO2排出量を削減することが、建設に伴う CO2排出量の削減に最も効果的であることが判断できる。

工種		CO ₂ 排出量 寄与率		
杭	杭地業工事		24%	
コンク	リート工事	41%		
鉄筋工事		16%		
	防水工事	1%		
	石工事	0%		
	タイル工事	2%	19%	
	木工事	1%		
その他	金属工事	4%		
その他	建具工事	3%		
	硝子工事	1%		
	塗装工事	1%		
	内外装工事	3%		
	型枠工事	2%		

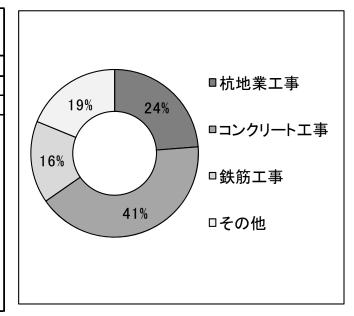


図 5-2-6 資材製造段階における工種ごとの CO2排出量寄与率

コンクリートの資材製造に係わる CO2排出量は、表 5-2-4 に示すように、普通ポルトランドセメントの影響が極めて大きく、単位コンクリートあたりの普通ポルトランドセメント量を減らすことが CO2を削減させる一つの有効な手段となる ⁹⁾. その代表的な例が、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュをセメントに混合させた高炉セメントおよびフライアッシュセメントなどの混合セメントである.

そこで、コンクリートの CO2排出量削減方法のひとつの例として、高炉セメント B 種への材料変更を想定し、モデル建築物で用いた全普通ポルトランドセメント分量のうち 50%を高炉スラグ微粉末に置換した場合のモデル建築物の CFP 算定結果を表 5-2-5 に示す。なお、コンクリートおよび鉄筋は、表 5-2-6 に示す値を算定に用いた。

資材製造段階における CO2排出量が、普通ポルトランドセメント使用時では 1,500 t-CO2であったのに対して、高炉セメント B 種相当品を用いた場合には 1,100 t-CO2となり、400 t-CO2の削減効果が見込まれることが明らかとなり、従来から言われているように混合セメントの使用が CO2を削減させる一つの有効な手段であることが確認された。但し、建設に伴う CO2排出量全体の中では、14%程度の削減

効果となっており、その他の低炭素化技術を効果的に組み合わせていくことが必要である。また、材料・ 工法の変更による資材物量の増加、工期の遅延や耐久性の低下などが生じると、ライフサイクルそれぞ れの段階においての CO2排出量に変化が生じるため、それらの影響を総合的に判断して、低炭素化技術 を採用していくことが必要になる。

このように、設計段階のようなできるだけ上流の時点において、対象建築物の建設に伴う CO2排出量を、ライフサイクル段階ごとに詳細に把握したうえで材料や工法を選定することが、効率的な CO2削減を目指すうえで重要である.

表 5-2-4 コンクリート材料の CO₂ 排出量の原単位 ⁹⁾

材料	CO2 排出量(kg-CO2/t)
普通ポルトランドセメント	766.6
フライアッシュ	19.6
高炉スラグ微粉末	26.5
天然細骨材(砕砂)	3.7
天然粗骨材(砕石)	2.9

表 5-2-5 CFP 算定結果(高炉セメント B 種使用時)

CFP 算定結果 [※] (耐用年数 60 年あたり)			
CFP 算定結果(CFP)	2,500	t-CO2 (端数処理のため内訳の合計値と異なる)	
内訳(ライフサイクル段階別)			
資材製造段階	1,100	t-CO ₂	
施工段階	740	t-CO ₂	
修繕・改修段階	620	t-CO ₂	
廃棄・リサイクル段階	110	t-CO ₂	

[※]本算定結果は CFP プログラムによる検証を受けていない

表 5-2-6 コンクリートおよび鉄筋の数量

名称	摘要	数量	単位
	Fc=15N/mm2 スランプ=15cm	18.9	m ³
コンクリート	Fc=24N/mm2 スランプ=18 cm	25.0	m ³
	Fc=27N/mm2 S スランプ=18 cm	3126.5	m ³
	SD295A D10	89200.0	kg
異形鉄筋	SD295A D13	96000.0	kg
天/レ政/別/	SD295A D16	3000.0	kg
	SD345 D22	2300.0	kg

5. 2. 4 実建築物による CFP 算定

本項では実際に CFP 認証を取得した研修用宿泊施設について示す.

(1) 建築物の概要

表 5-2-7 に建物概要,図 5-2-7 に外観パース図を示す.対象建物は鉄筋コンクリート 3 階建ての一般的な研修宿泊施設である.

用途	研修用宿泊施設
構造規模	PCa 工法による RC 造,地上 3 階
基礎形式	直接基礎
建築面積	1,120.23 m ²
延床面積	2,755.58 m ²
最高高さ	9.99 m
外装仕上	屋根:AS 外断熱露出防水
	外壁:フッ素樹脂塗装

表 5-2-7 建物概要



図 5-2-7 外観パース図

(2) CFP 算定方法

CFP 算定方法は前項のモデル建築物と同様である. 算定に必要な材料種類やその資材数量といった一次データに関しては、設計情報に基づく積算データを用いた.

(3) CFP 算定結果および考察

対象建物の設計・積算情報に基づく CFP 算定結果 ¹⁰⁾を表 5-2-8 に示す. また, 本算定結果の CFP プログラムによる表示例を図 5-2-8 に示す.

CFP 算定の結果,耐用年数 65 年あたり 4,140t-CO2の CO2排出量となった.ライフサイクル段階ごとでは,資材製造段階における CO2排出量が 1,780 t-CO2と最も高い寄与率を示し,次いで,修繕・改修段階が 1,567t-CO2,施工段階が 666 t-CO2となった.廃棄・リサイクル段階は 127 t-CO2とその他の段階に比べて低い寄与率となった.

最も寄与率が高い資材製造段階について,工種ごとに分類し CO2寄与率の内訳を算定すると表 5-2-9 のようになる.工種ごとで比較すると,コンクリート工事と躯体 PC 工事の寄与率の合計が 48%と最も高く,次いで,鉄筋工事が 17%となった.TTC つくばは,PCa 工法を用いた RC 造のため,コンクリートに関する CO2排出量の割合が比較的大きいことが数値的に明らかとなった.

CFP 算定結果 (耐用年数 65 年あたり)		
CED签字外用	4, 140	t-CO ₂ (端数処理)
CFP算定結果	1. 5	t-C02 (床面積 1m²・耐用年数 65 年あたり)
内訳(ライフサイクル段階別)		
資材製造段階	1, 780	t-CO ₂
施工段階	666	t-CO ₂
修繕・改修段階	1, 567	t-C0 ₂
廃棄・リサイクル段階	127	t-C0 ₂

表 5-2-8 CFP 算定結果 10)

※CFPの基本概念により、数値の単位はCO2以外の温室効果ガスの影響をCO2換算したt-CO2eで示されるが、本算定ではCO2以外の温室効果ガスの排出は考慮していないため、t-CO2で示した.

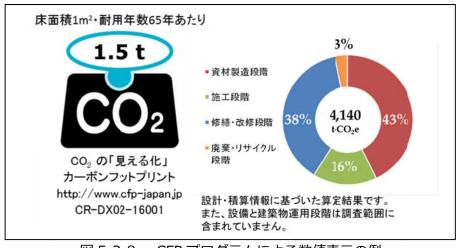


図 5-2-8 CFP プログラムによる数値表示の例

表 5-2-9 資材製造段階における工種ごとの寄与率

工種	寄与率	工種	寄与率	
杭地業工事	5%	型枠工事	0%	
がいる未工学		躯体雑工事	0%	
コンクリート工事	25%	組積工事	0%	
コンググード工事		防水工事	2%	
躯体 PC 工事	23%	石及び擬石工事	0%	16%
が 体 「 C 工事		タイル工事	1%	
鉄筋工事	17%	木工事	0%	
少人加工事		金属工事	5%	
鉄骨工事	6%	左官工事	3%	
		木製建具工事	0%	
内外装工事	11%	金属製建具工事	2%	
ドソバ衣工学		ガラス工事	3%	
		塗装工事	0%	

(4) CFP算定結果を用いた分析

CFP 算定結果から建設に伴う CO_2 排出量のうち、特に影響が大きい項目を定量的に把握することができるようになる。それを利用することで、より効果的な CO_2 排出量の削減対策を検討することが可能となる。

TTC つくばの例では、前述のとおり、資材製造段階ではコンクリートに関する CO_2 排出量の割合が大きいことが分かった。また、修繕・改修段階についても、資材製造段階に次いで大きな割合となっていることも確認できた。そこで、例えば、低炭素化コンクリートの適用や内外装材の長寿命化を検討すれば、図 5-2-9 に示すように、566 t- CO_2 もの大きな削減を実現できることが事前に定量的に把握することができる。こうした情報を基に、費用対効果等を考慮した CO_2 排出量の削減対策を検討できる

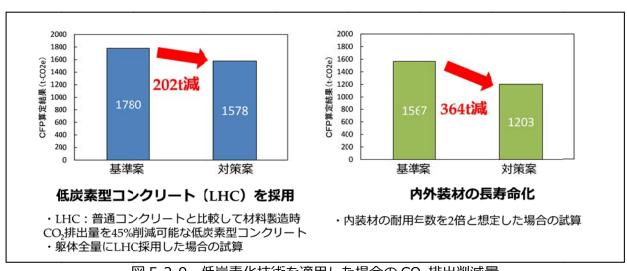


図 5-2-9 低炭素化技術を適用した場合の CO₂排出削減量

5.3 まとめ

本章では、CFP プログラムによりモデル建築物および実建築物の建設に伴う CO2排出量を評価した結果について報告した。

建築物の建設に伴う CO2排出量は、資材製造過程や輸送といったプロセスをさかのぼった影響が含まれるため、運用段階と比べて透明性を確保したうえでの評価がしにくい面がある。そこで、CFP プログラムを活用することで、CO2排出量がどういった根拠に基づいて算定されているのかが公開されることになり、透明性が確保されると考えられる。また、CFP-PCR と CFP 算定結果のそれぞれに、第三者により検証が行われることによって、一定の信頼性が確保されると考えられる。

以上より、CFPプログラムように統一的な評価軸を用いて、様々な建築物の CO2排出量の情報を蓄積することにより、より合理的な低炭素材料や工法の開発に繋がることが期待できる。なお、CFPプログラムでは、建築物のように同一製品の大量生産ではない単品受注請負型の製品に対する評価は、これまで積極的に行われておらず、現時点においては、算定ルールである PCR-CFP に様々な検討の余地が残されていると考える。今後、取り組みを普及させる中で、透明性を確保したまま、より適切な評価が可能となるように検討を進めていくことが望ましいと思われる。

-第5章の参考文献-

- L. Price, S. de la Rue du Can, J. Sinton, E. Worrell, Z.Nan, J. Sathaye and M. Levine: Sectoral Trends in GlobalEnergy Use and Greenhouse Gas Emissions, ErnestOrlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2006
- 2)伊香賀俊治,村上周三,加藤信介,白石 靖幸:我が国の建築関連 CO2排出量の 2050 年までの予測: 建築・都市の環境負荷評価に関する研究,日本建築学会計画系論文集第535号,pp.53~58,2000.9
- 3)建築業協会: BCS 行動計画, 2008
- 4)CFP プログラム: https://www.cfp-japan.jp/
- 5)CFP プログラム: CFP 宣言認定製品一覧, https://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/permission.php
- 6)CFP プログラム:認定 CFP-PCR 一覧, https://www.cfp-japan.jp/calculate/authorize/pcr.php
- 7)CFP プログラム:CFP 算定用二次データ,https://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/data.html
- 8)CFP プログラム:安藤ハザマモデル建築物登録情報, https://www.cfp-japan.jp/common/pdf_permission/000913/CR-DX01-14001.pdf(2017年10月参照)
- 9) 社団法人土木学会, コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案), コンクリートライブラリー125, pp.14~15, 2005
- 10)CFP プログラム:TTC つくば登録情報,

https://www.cfp-japan.jp/common/pdf_permission/001284/CR-DX02-16001.pdf

第6章 CFP を活用した低炭素型コンクリート適用による CO₂排出量削減効果の検証

第6章 CFPを活用した低炭素型コンクリート適用による CO₂排出 量削減効果の検証

6.1 はじめに

第5章において建築物の建設に伴う CO_2 排出量の評価手法として、CFPの活用が、信頼性、透明性の観点から一定の評価軸として有効であることを示した。

本章では、5.2.4 項で示した実建築物をモデルケースとして、低炭素型コンクリートの種類、適用部位による CO_2 削減効果の検証や長期強度改善が CO_2 排出量に及ぼす影響の検証を示し、要素技術である低炭素型コンクリートと建築物の CO_2 排出量の評価手法に関連性を持たせることを試みた。

6. 2 低炭素型コンクリートの種類,適用部位による CO₂ 削減効果の検証

(1) 想定する低炭素型コンクリート, 適用ケースの設定

本節では、5.2.4 項で示した実建築物をモデルケースとして、 CO_2 削減量が異なる各種低炭素型コンクリートを適用した場合の CO_2 削減効果について検証する。表 6-2-1 に検証に用いたコンクリートの数量、各部コンクリートの設計基準強度 Fc および各種低炭素型コンクリートの CO_2 排出原単位を示す。

各種低炭素型コンクリートの設定は CO₂削減効果が異なる下記の4つとした.

①「普通」: 普通ポルトランドセメント (NC) 100%使用

②「低置換」:「普通」の CO₂ 排出量を 20%削減

③「中置換」:「普通」の CO₂ 排出量を 40%削減

④「高置換」:「普通」の CO₂ 排出量を 60%削減

「普通」はセメントに NC を使用したコンクリートで、「低置換」、「中置換」、「高置換」は、OPC に副産物系混和材を置換することで、 CO_2 排出量をそれぞれ 20%、40%、60%を削減したセメント(高炉セメント A 種、B 種、C 種を想定)を使用した場合の低炭素型コンクリートを想定した。

表 6-2-1 各種・各部コンクリートの数量,設計基準強度, CO₂排出原単位

	部位	コンクリー ト Fc 数量 (N/mm²)	Fc	各種コンクリートの CO ₂ 排出原単位 ^{*1} (kg-CO ₂ /m ³)				
	마깐		(N/mm ²)	普通	*² 低置換	*3 中置換	*4 高置換	
	基礎部	1002	27	313	263	212	162	
	上部	494	36	334	280	225	170	
現場打ち	その他(捨 て,防水押さ え,雑コン 計)	86	18	285	240	195	150	

*1: コンクリートの CO_2 排出原単位は「日本建築学会: 建物のLCA指針 (2013)」を参照した(生コン・PCa製造工程および調達輸送工程を含む) (OPC: 783kg-CO2/t)

*2:低置換=OPCのCO₂排出量を20%削減(626kg-CO₂/t)
*3:中置換=OPCのCO₂排出量を40%削減(470kg-CO₂/t)
*4:高置換=OPCのCO₂排出量を60%削減(313kg-CO₂/t)

検証した適用ケースとしては、①全部材に「低置換」、②全部材に「中置換」を用いた場合、③基礎部のみに「高置換」を用いた場合、④基礎部に「高置換」+上部に「低置換」を用いた場合の4ケースを設定した。



図 6-2-1 各種低炭素型コンクリートの適用ケースの設定

(2) 算定結果

図 6-2-2 に各種低炭素型コンクリート適用による CO_2 削減量を示す。ケース①,③の削減効果が 132 \sim 152 t- CO_2 , ケース②,④の削減効果が 233 \sim 264 t- CO_2 であり, CO_2 排出量の削減効果のみの観点では,ケース②,④がより効果的と判断される。但し,本検証では,各低炭素型コンクリートのセメント量は Fc に対して一定としているが,実際には適用部位と副産物系混和材の置換率によっては,中性化抵抗性や強度発現を確保するために,水結合材比を下げてセメント量を増やす必要が生じることがあることも考慮しなければならない。

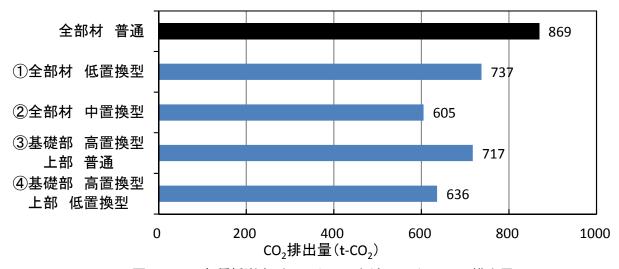


図 6-2-2 各種低炭素型コンクリート適用による CO₂排出量

このように、実際に CFP で算定した情報があれば、同じ原単位を用いることで、ごく単純な積み上げにより使用されるコンクリート部材全体の CO_2 排出量を導出することができる。このような試算は、算定範囲を限定することで多く実施されているが、CFP の利点は、建物全体の中での算定結果の位置づけが明確になることで、より効果的な削減策を選択できることにある。

これまでに低炭素型コンクリートは、使用される材料の種類等によって、容易に適用できる地域もあれば、調達や製造設備の整備に非常に手間がかかる地域もある。そうした中で、対象の建築物に適用する低炭素型コンクリートが建物全体の排出量を考慮したうえでも、低炭素型コンクリートを適用する必要性が高いかどうかについて、広い視点でみていくことが求められるようになると考える。

6. 3 長期強度改善が CO₂ 排出量に及ぼす影響の検証

本節では,第3章で示したS値を踏まえた実際の調合算定式を基準として,第4章で示したS値改善効果によりセメント量低減量を算出して,それが CO_2 排出量の観点からどの程度の効果があるのかを検証した.

表 6-3-1 に、調合算定式に基づく設計基準強度と管理強度・水結合材比の関係を示す。設計基準強度 60N/mm² を満たすためには、調合強度(呼び強度)としては 88.8N/mm2 必要になる。それに対応する水結合材比は 25.5N/mm² であり、結合材量としては BB: 534kg/m3、FA: 133kg/m3 となる。表 6-3 には、普通ポルトランドセメントと中庸熱ポルトランドセメントの Fc60N/mm2 の合算定式に基づく設計基準強度と管理強度・水結合材比の関係の例を参考に示すが、S 値の影響により必要な水結合材比に差が生じ、結合材量に差がみられる。

表 6-3-2 には、粗骨材種類を SG に変えることで S 値が $6N/mm^2$ 低くなることを想定した場合の設計 基準強度と管理強度・水結合材比の関係を示す。 その結果、BB の使用量は、474kg/mm2、FA は $118kg/m^3$ となり、それぞれ $60kg/m^3$ 、 $15kg/m^3$ の削減量となる。これらを CO_2 削減量に換算すると、 $1m^3$ あたり約 $28.2kg-CO_2$ の削減量に相当する。

これらの結果を基準として,実建築物で実際にどの程度の CO_2 排出量の差が生じるのかについて考えると,例えば高層建築物の地下躯体のうち $Fc60N/mm^2$ が必要な部材でかつ温度ひび割れが懸念されるような部分が $2000m^3$ あるとすれば,S 値改善前では約 734 t- CO^2 の排出量だったものが S 値改善により約 678 t- CO^2 になり,56 t- CO^2 の削減効果が得られることになる.

このように高強度コンクリートの S 値改善効果は、より経済的かつ低炭素化に繋がる合理的な対策になり得る可能性にあることがわかる.

表 6-3-1 調合算定式に基づく設計基準強度と管理強度・水結合材比の関係 (第 2 章の低炭素型高強度コンクリート)

管理材齢	打込み時期	結合 材種 類	設計基準強 度 (N/mm²)	₂₈ S ₉₁ (N/mm²)	指定強度 (N/mm²)	標準偏差 (N/mm²)	調合強度 (N/mm²)	水結 合材 比 (%)	結合材量 (kg/m3)
2	通年	BBF A	60	14	74	7.4	88.8	25.5	BB: 534 FA: 133

表 6-3-2 調合算定式に基づく設計基準強度と管理強度・水結合材比の関係 (普通ポルトランドセメント,中庸熱ポルトランドセメントの一例(参考))

管理材齢	打込み時期	結合材種類	設計基準強 度 (N/mm²)	₂₈ S ₉₁ (N/mm²)	指定強度 (N/mm²)	標準偏差 (N/mm²)	調合強度 (N/mm²)	水結合 材比 (%)	結合材量 (kg/m3)
28	標準期	N	60	10	70	7.0	84.0	28.0	N : 597
28	通年	М	60	3	63	6.3	75.6	32.5	M : 535

表 6-3-3 調合算定式に基づく設計基準強度と管理強度・水結合材比の関係 (第 2 章の低炭素型高強度コンクリートの S 値改善)

管理材齢	打込み時期	結合 材種 類	設計基準強 度 (N/mm²)	₂₈ S ₉₁ (N/mm²)	指定強度 (N/mm²)	標準偏差 (N/mm²)	調合強度 (N/mm²)	水結 合材 比 (%)	結合材量 (kg/m3)
2 8	通年	BBF A	60	8	68	6.8	79.2	29.0	BB: 474 FA: 118

6.4 まとめ

第6章では、5.2.4で示した実建築物をモデルケースとして、低炭素型コンクリートの種類、適用部位による CO_2 削減効果の検証や長期強度改善が CO_2 排出量に及ぼす影響の検証を示し、要素技術である低炭素型コンクリートと建築物の CO_2 排出量の評価手法に関連性を持たせた。

また,第4章で提案したような長期強度性状の改善に伴うS値改善の効果が実際にCO₂排出量削減効果にどの程度影響するのかに関する検証を行い,低炭素型高強度コンクリートを適用する場合において,長期強度性状の改善がCO₂排出量削減の観点からも重要な技術であることを示した

建築物への低炭素型コンクリートの実用化には発注者・監理者の理解を得ることが重要であることから、これらの検討を含めて低炭素型コンクリートの適用による効果を提案することで、低炭素型コンクリートの実用化において有効なアプローチになることが期待できる.

第7章 総 括

第7章 総括

7.1 本研究の総括

第1章では、本研究の背景および目的について述べるとともに、本論文の構成について述べた. 地球規模での温暖化防止に向けた動きに呼応するように、設業の低炭素化に向けた技術開発がますます加速しており、主要な建設材料であるコンクリートの CO2 排出削減に着目した低炭素型コンクリートの開発が加速している. 一方で、低炭素型コンクリートは、副産物系混和材の組合せ、置換率および強度レベル等で特徴が異なり、特に近年、建築物の高層・大型化に伴いその用途が拡大している高強度領域においての知見の蓄積が重要であることなど、社会的背景や建設業界の動向をふまえた本研究の位置づけを示した.

第2章では、低炭素型コンクリートの実用化にあたって関連する規準・規格・法令上の現状の取扱いについて整理した。また、本論文の位置づけを明確にするために、従来から進められている混合セメント型のコンクリートの研究を概観し、その特徴について整理するとともに、最新の研究動向について調査し、必要な情報を抽出した。さらに、実際に低炭素型コンクリートを建築物に適用した場合を想定して、建築物全体の CO₂ 排出量削減への貢献度を正しく評価するために必要な、環境影響評価手法の現状を整理した。

第3章では,第2章で得た知見を踏まえて,本研究で具体的に検証を進めた低炭素型高強度コンクリートの位置づけおよび基本コンセプトを示した。また,強度特性,耐久性および発熱特性といった高強度コンクリートとして把握すべき性能を室内実験および実機実験により検証し,実用化に必要な諸性能を明らかにするとともに改善すべき課題を抽出した。その結果,柱模擬試験体や簡易断熱養生供試体といった実際の部材レベルを想定した高温履歴を再現した場合において,強度発現が鈍化し,長期強度発現が停滞することが確認された。また,その現象が,実用化においては,経済性だけでなく環境負荷の観点からも不利になることを示した。

第4章では、第3章で抽出された課題である高温履歴をうけることで長期強度が停滞する現象について、既往の研究をレビューしながらそのメカニズムの解明に向けていくつかのシリーズに分けて検討した。まずは、水分供給と高温履歴のどちらの影響がより卓越しているかを把握するために、高温履歴を再現させながら水分供給の有無の影響を確認し、その結果、高温履歴の影響が支配的であることを明らかにした。続いて、数種類の結合材と粗骨材を組合わせて、高温履歴による圧縮強度と割裂引張強度の影響について検証し、モルタルと粗骨材の線膨張係数差が大きいほど高温履歴による強度の鈍化が顕著

になることを示した. そして, それらの結果について, モルタルと粗骨材のひずみ差を直接測定する方法を提案・実施することで, 高温履歴をうけることで長期強度が停滞する現象のメカニズムがモルタルと粗骨材の線膨張係数差による骨材界面の剥離現象であることをより多角的に検証し, 実用化にあたっての改善手法に関して提案した.

第5章では,第2章で整理した建築物を対象とした環境影響評価手法の現状を踏まえて,CFPを活用した建築物の建設に伴う CO_2 排出量評価手法を提案するため,実際の設計情報を用いたモデル建築物による検証および実建築物による検証を行い,建築物そのものを評価する手法としての妥当性ならびに有効性を示した.

第6章では、第5章で提案した CFP を活用した CO_2 排出量評価手法を用いて、各種低炭素型コンクリートの種類、適用部位による CO_2 排出削減効果の検証を実建築物の情報を用いて検証した。その結果、低炭素型コンクリートが適材適所型の適用が、 CO_2 排出削減の観点からも有効であることを定量的に示し、その評価方法として CFP が有効であることを示した。

さらに、第4章で提案した長期強度性状の改善が実際に CO₂排出量削減効果にどの程度影響するのかに関する検証を行い、低炭素型高強度コンクリートを適用する場合において、長期強度性状の改善が CO₂排出量削減の観点からも重要な技術であることを示した.

これらの研究成果において、低炭素型高強度コンクリートの実用化に必要な性状を提示し、さらには課題となる長期強度停滞現象に関するメカニズムの解明および改善手法の提案を示すことによって、建築物に要求されるあらゆる条件において選択肢に加えることが可能となり、今後、低炭素型コンクリートを建築工事への適用拡大への一助となることが期待できる。さらに、低炭素型コンクリートの適用による建築物全体での CO_2 排出量の削減効果を、統一的な評価である CFP を活用することで、発注者・管理者への理解の共有へ有効な手段となり、低炭素型コンクリートの提案とパッケージで提案することによって低炭素型コンクリートの実用化がより具現化されやすくなるものと思われる。

7.2 課題と展望

本研究において報告した低炭素型高強度コンクリートは、実用化にあたっての製造上の制約や既往の文献による性状の傾向をふまえて決定したものであるが、背景で述べたように結合材の組合せや置換率、使用する混和材料等によって性状が変わることに留意しなければならない。現在、低炭素型コンクリートの初期強度発現や中性化抵抗性の改善に向けた様々な研究が積極的に行われており、新しい混和材料の開発が進むことも想定される。そうした中で、さらなる経済性や CO2 排出削減効果が期待できる可能性があるアイデアが出てきたときには、今回の研究成果をベースに、さらなる検証を進めていくことが求められる。コンクリートは少しのアイデアで大きく性能が変わることを念頭において、常に最先端の情報収集や新しい知見の導出に努めることが必要と考える。

また、環境影響評価においても、国内では CO₂排出量が重要視される傾向にあることを、既往の文献で示したが、今後 LCA 手法が建設業界に定着していくに従って、その他の環境領域も考慮したマルチクライテリア型の評価が求められることが想定される。そうしたときに、例えばセメントの製造が多くの廃棄物を受け入れている現状を考慮する必要性など、より高度な検証が必要になることも考慮して、世界的な動向と国内の動向について注意深く調査していくことが求められる。