

土木学会「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針」の概要

坂井悦郎*¹・渡辺博志*²・伊代田岳史*³・林 大介*⁴

概要 環境負荷低減を目的としたコンクリート材料での取組みの一つである、高炉スラグ微粉末を利用した結合材の利用が考えられる。これまで、高炉セメントB種としての知見は多く蓄積され、利用が促進されてきた。一方で、高炉セメントC種相当程度の高置換したセメントの利用は、まだまだ進んでいない。ここでは、四半世紀ぶりに改訂された高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針についての概要を解説する。コンクリート標準示方書2017年版に準拠した内容として改訂され、この指針で設計・施工が可能ないように改訂を実施した。また、新たに得られた知見や新しい利用方法などを資料編にまとめた。

キーワード：高炉スラグ微粉末、環境負荷低減、中性化

1. はじめに

地球温暖化防止やSDGsなどが社会的に取り組みられている中で、コンクリート産業においても、環境負荷低減について、多くの取組みが加速度的に行われている。セメント製造およびコンクリート製造において、地球温暖化物質であるとされるCO₂ガス排出量抑制に向けた様々な取組みの一つとして、混合セメントやセメント代替材料である混和材料の利用があげられる。混合セメントやセメント代替材料の使用は、製造時に大量のCO₂を排出するクリンカーの使用量を減少させることによる環境負荷低減対策技術であり、大きなインパクトがあるといえる。日本においては、過去からセメント代替材料として、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ、石灰石微粉末などが多く利用されてきた実績がある。その中でも潜在水硬性を有する高炉スラグ微粉末は、コンクリートに大量に利用でき、クリンカーと置き換えられることから、古くから利用されてきた。土木学会においても、1996年にコンクリートライブラリー（以下、CLと略記）86「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針（案）」を発刊し、その利用を促してきた。しかし、発刊より四半世紀近くが経過し、環境に対する社会的情勢やコンクリート技術が革新的に変化した。また高炉セメントB種相当での利用は、示方書を参照可能であるが、それ以上の置換率までをカバーした指針が必要不可欠となる。そのため、既存の指針では、現状とそぐわないような記述が散見されたり、混和材料として大量に高炉スラグ微粉

末を利用するケースが見られたりするようになってきた。

そこで、2016年に既存の指針を現行に合わせるべく、改訂作業に着手した。2年間の活動の成果として2018年9月にCL151「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針」を発刊する運びとなったことから、本稿ではその内容を紹介する。

2. 改訂作業

「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針（案）」の改訂作業として、2016年に土木学会に2種委員会として、改訂委員会が設立された。そのメンバー（計46名）を表-1に記す。受託側として、高炉スラグ微粉末に造詣が深い大学の先生方および利用促進を考えていただけの発注者をお願いし、委託側として高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートを施工する施工者と材料提供者の構成とし、多くの方々の協力を得た。また委員会は、品質・設計WG（主査：細田暁教授、横浜国立大学）と材料・施工WG（主査：佐川康貴准教授、九州大学）の二つのWGを設置して、議論を実施した。また、既存指針にも取りまとめられていた詳細な実験結果や使用実績などの資料編を再構築するために、別途資料編WG（主査：檀康弘、鉄鋼スラグ協会）も設置して、最新の研究データを収集・掲載することを試みた。

委員会は、同時に設立された264委員会（混和材料を多量に使用したコンクリートの設計・施工指針小委員会）と情報交換をしながら、運営された。本委員会では、高炉スラグ微粉末のみを取り扱い、JIS R 5211高炉セメントにおける高炉セメントC種相当（高炉スラグ置換率70%）までの範囲を対象とした。それ以上の添加量となる場合および他の混和材料と組み合わせる場合には、前述の混和材料を多量に用いたコンクリートの設計・施工指針に従うものとした。両委員会には、別途

*1 さかい・えつお／東京工業大学物質理工学院材料系 名誉教授（正会員）

*2 わたなべ・ひろし／(国研)土木研究所 理事（正会員）

*3 いよだ・たけし／芝浦工業大学 教授（正会員）

*4 はやし・だいすけ／鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造グループ長（正会員）

表-1 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計指針改訂小委員会委員構成

委員長 幹事長	坂井 悦郎 伊代田岳史	東京工業大学 芝浦工業大学	副委員長	渡辺 博志	土木研究所
委員	浅本 晋吾 芦塚憲一郎 石田 哲也 上田 洋 上野 敦 加藤 佳孝 河合 研至 佐伯 竜彦 佐川 孝広 佐川 康貴	埼玉大学 西日本高速道路㈱ 東京大学 鉄道総合技術研究所 首都大学東京 東京理科大学 広島大学 新潟大学 前橋工科大学 九州大学		添田 政司 中村 英佑 橋本 親典 植原 弘貴 細田 暁 松田 芳範 溝渕 利明 宮澤 伸吾 宮本慎太郎 山路 徹	福岡大学 土木研究所 徳島大学 福岡大学 横浜国立大学 東日本旅客鉄道㈱ 法政大学 足利工業大学 東北大学 港湾空港技術研究所
委託者側委員 (15団体)	小野里みどり 石田 知子 林 大介 橋本 学 室野井敏之 水野 浩平 小笠原哲也 宇野洋志城 北川 真也 大脇 英司 久我龍一郎 安藤慎一郎 吉田 邦勝	㈱安藤・間 ㈱大林組 鹿島建設㈱ 鹿島建設㈱ 鹿島建設㈱ (~2017.3) 鹿島建設㈱ (2017.3~) 五洋建設㈱ 佐藤工業㈱ 佐藤工業㈱ 大成建設㈱ 太平洋セメント㈱ ㈱竹中土木 ㈱竹中土木 (~2017.3)		關 繭果 齊藤 和秀 網野 貴彦 田中 亮一 田中 徹 土師 康一 佐藤 幸三 椎名 貴快 阿合 延明 森本 孝敏 佐藤 文則 檀 康弘 鈴木 雅博	㈱竹中土木 (2017.4~) 竹本油脂㈱ 東亜建設工業㈱ 東亜建設工業㈱ 戸田建設㈱ 戸田建設㈱ 西松建設㈱ 西松建設㈱ BASF ジャパン㈱ ㈱フローリック 前田建設工業㈱ 鉄鋼スラグ協会 PC 建設業協会

連絡委員会を設立し、置換率がシームレスに連結できるように議論を実施している。また、報告書の発刊を同時期とし、2018年9月7日に両委員会の報告会を同日開催とした。なお、コンクリート標準示方書の改訂委員会および改訂発刊作業が同時期に実施され、2018年3月に発刊・報告会を実施したことを受けて、本指針もコンクリート標準示方書2017年版に準拠した記述としている。

3. 改訂の方針と主なポイント

3.1 改訂の方針

本指針の改訂において改訂方針を以下の3つと定めた。

(1) 「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針」から、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計値および耐久性に関する照査の内容を加えた「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針」

として改訂すること

(2) 本編には、一般的なポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートに関する内容を記述し、近年開発された特殊な用途でプレミックスされた製品や、セメントを構成する原材料を調整した結合材などを用いる新技術については資料編にて整理すること

(3) コンクリート標準示方書、関連基規準類の改訂などをはじめとして、旧指針の情報を見直し、最新の研究成果や施工報告を追加すること

3.2 改訂の主なポイント

本指針の改訂の主なポイントを下記に示す。

(1) 2017年版コンクリート標準示方書における記述を前提として章を構成する

(2) 旧指針以降の関連基規準類や研究成果、施工報告を反映・紹介する

Outline of Recommendations for Design and Construction of Concrete Using Ground Granulated Blast-Furnace Slag

By E. Sakai, H. Watanabe, T. Iyoda and D. Hayashi

Concrete Journal, Vol.57, No.11, pp.855~860, Nov. 2019

Synopsis The use of binders using ground granulated blast-furnace slag, which is one of the initiatives for concrete materials aimed at reducing environmental impact, bears consideration. A vast amount of knowledge about blast furnace cement Class B has been accumulated over the years and its use has been steadily promoted. On the other hand, the use of cement with a high substitution rate that is equivalent to blast furnace cement Class C has not made much progress. This paper gives an overview of the Recommendations for Design and Construction of Concrete Using Ground Granulated Blast-Furnace Slag, which have been revised for the first time in a quarter century. The content was revised in line with the 2017 Standard Specifications for Concrete Structures to allow design and construction based on the latest standards. Further, newly obtained knowledge and new usage methods have been summarized in the Appendix.

Keywords : ground granulated blast-furnace slag, environmental impact reduction, carbonation

1章 総則	11章 検査
2章 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの品質	12章 マスコンクリート
3章 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計と照査	13章 寒中コンクリート
4章 材料	14章 暑中コンクリート
5章 配合設計	15章 海洋コンクリート
6章 製造	16章 高流動コンクリート
7章 レディーミクストコンクリート	17章 高強度コンクリート
8章 運搬・打込み・締固めおよび仕上げ	18章 プレストレストコンクリート
9章 養生	19章 プレスクャストコンクリート
10章 品質管理	20章 工場製品
	21章 その他の特殊コンクリート

図-1 目次構成

(3) 高炉スラグ微粉末の置換率として、5%を超え70%以下を対象とする

(4) JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」の改訂を反映する

(5) 高炉スラグ微粉末3000、高炉スラグ微粉末4000および高炉スラグ微粉末6000の使用を前提とする(8000の使用実績はほとんどないため、記述からは外す)

(6) コンクリートの施工が「示方書が想定している標準的な施工方法」に準拠することを原則とする

(7) 2017年版コンクリート標準示方書に新たに導入された「水の浸透に伴う鋼材腐食に対する照査」を追加する

(8) 中性化速度係数について、最近の研究成果や実構造物の調査報告などを踏まえて見直しを実施する

3.3 目次構成

図-1に今回発刊した指針の目次構成を示した。まず、設計・施工指針と改めたことから、3章に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計と照査を新設した。ここで、照査方法について、詳細に記載することとした。また、章構成を2017年版コンクリート標準示方書に準拠した。また、舗装およびダムコンクリートについては、特殊コンクリートの章に含めることとした。また、昨今の省人力施工や生産性向上に向けて発展的と考えられるプレストレストコンクリートやプレキャストコンクリートへの高炉スラグ微粉末の利用も有益と考えたため、章を新設した。

資料編においては、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの特徴については、最新の知見や実験結果をふんだんに取り入れて、データを大幅に更新した。1996年版に記載のあった、活性度指数とフロー値比に関する実験結果、置換率の分析方法、養生期間および中性化深さの記述については、現状では解決した問題や利用されていない分析方法などが多く記載されていたことから改訂指針では削除することとした。必要に応じて、1996年版を参照されたい。一方、最新の取組みである、耐久性確保・向上に寄与する実施工の事例や、高炉スラグ微粉末を用いた最新事例(特に高置換したセメントやその混和剤、プレストレストコンクリート用に開発された高炉セ

メント)などを紹介することとした。さらに、環境負荷低減を意識して、高炉スラグ微粉末の出荷やデリバリーの状態を紹介した。

4. 改訂内容

4.1 総則

総則においては、本指針の対象範囲を明確にした。まずは、JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」の改定に伴い、高炉スラグ微粉末3000を追加し、指針の中で取り扱うことを宣言した。また、あらかじめ混合したセメント(高炉セメントA、B、C種等)についても、混和材として用いる場合と同等の性能を有していることを追記し、高炉セメントを利用する際にも本指針が参考になることを紹介した。また、本指針で取り扱う置換率のうち、これまでの研究成果として30%以下の添加量であれば普通ポルトランドセメントと同等に取り扱うことができると判断したため、指針の内容は主として、置換率の範囲を30~70%とした。また、上述したが、添加量が70%を超える場合やフライアッシュやシリカフェームとの合算が70%を超える場合については、CL152「混和材を大量に使用したコンクリートの設計・施工指針(案)」に準拠する旨を記載した。加えて、表-2に示す高炉スラグ微粉末の種類と効果が期待できる置換率の範囲を見直して、高炉スラグ微粉末の種類と置換率を選択しやすくすることを試みた。

4.2 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの品質

ここでは、コンクリートの材料分離(充填性とブリーディング)などを適切に制御し、材料係数を所要の範囲内に収めるために「硬化体の均質性」を規定して記述を加えた。ここで、硬化体の均質性とは、コンクリートの材料係数 γ_c における「供試体と構造物中の材料物性の差異」を決定する品質のことを示している。つまり、コンクリートが施工の作業を終えた後も設計で定める材料係数を満足する硬化体の均質性を有していることを定めている。また、コンクリートの劣化に対する抵抗性においては、硫酸塩の作用が激しい環境において、適切な高炉スラグ微粉末の置換率とセッコウ添加率を試験により確認するのがよいとした。中性化に関する記述について

表-2 使用目的に応じた高炉スラグ微粉末の種類と置換率の目安

使用目的 \ 種類	高炉スラグ 微粉末 3000	高炉スラグ 微粉末 4000	高炉スラグ 微粉末 6000
水和熱による温度上昇の抑制 ^{※1}	50～70%	50～70%	60～70%
塩化物イオン等の浸透に対する抵抗性の向上	40～70%	40～70%	40～70%
アルカリシリカ反応の抑制	40～70%	40～70%	40～70%
硫酸塩に対する抵抗性の向上	50～70%	50～70%	50～70%

※1 高炉スラグ微粉末の反応は温度依存性を有することから、近年、施工時にコンクリート温度が高くなる場合に温度ひび割れ等の問題が生じることが報告されているため、注意が必要である。一方、高炉スラグ微粉末 3000 は温度ひび割れに対して有効となる。

は、これまで数多くの高炉セメントコンクリート構造物を調査した結果、建設後 50 年程度経過したものの、中性化深さが 20 mm を超えるものがほとんどなかったとの実測から、信頼できるデータに基づいて、コンクリートの中性化については、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同様に扱ってよいこととした。ただし、置換率が高炉セメント B 種相当を上回るものでは、データが少ないことから、試験により確認が必要であること、また混和材大量使用となる場合には CL152「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案）」を参照することを記載している。

さらに、環境負荷低減効果については、これまで土木学会および日本コンクリート工学会、JIS などで様々な提言がなされてきていることから、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの環境負荷低減効果を示す場合には、信頼できる資料を用いるなど適切な方法で検討することを明記したが、その方法については、今後さらなる検討を重ねる必要がある。

4.3 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計と照査

設計と照査の章（指針 3 章）は、今回の改訂により新設した章であり、前述した通り、本指針では 2017 年版コンクリート標準示方書に示される考え方に従って設計・施工がこの指針で実施可能になるように工夫をした。ここで特に議論したのは、中性化進行による鉄筋腐食である。2017 年版示方書から、水の浸透に伴う鋼材腐食の照査が導入された。そのため、本指針においても、示方書にならうように追記した。ただし、水分浸透係数の特性値については、示方書では「コンクリートの水結合材比および結合材種類により推定する」と書かれているが、高炉スラグ微粉末を用いたデータは、まだ不足しているために、今後の整備を期待して、示方書を参照する旨を記載した。一方で、近年の研究の成果より高炉スラグ微粉末を高置換した場合には、乾燥や中性化により多孔化すると報告もあるため、この指針では実構造物の調査

データによる中性化速度係数に重点をおいて議論を進めた。中性化の照査における中性化速度係数は、最近の研究成果や実構造物の調査報告より、前述した通り、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同等との報告もあり、k 値を 1.0 とする結果も得られている。2017 年度版示方書〔設計編〕では、k 値を 0.7 と設定しているが、特に高炉スラグ微粉末が 60% 以下で水結合材比が極端に大きくなくかぶり十分大きい場合には、実構造物調査や自然暴露実験等の実績に基づいて、0.7 から 1.0 の範囲で適切に k 値を定めるとよいと明言した。

4.4 材料・配合・製造

本指針により設計・施工するコンクリートに用いる高炉スラグ微粉末は、高炉スラグ微粉末 3000、4000、6000 を対象としている。また、スラグ中に含まれている三酸化硫黄（SO₃）の含有率によっては、各種特性が変動することも知られていることから、SO₃ 含有率よりセッコウの添加の有無やその量を確認しておくことが望ましいと記述した。用いるセメントは、基本は普通ポルトランドセメントであるが、近年の研究により初期強度を確保したい場合には、早強ポルトランドセメントなどが用いられる場合があるため、このことも記載した。ただし、高炉スラグ微粉末の含有量が結合材の 70% を超える場合や三成分系の混合セメントとなる場合には、CL152「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案）」を参考に適切な高炉スラグ微粉末の置換率を決定することがよいとした。加えて、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは粘性が増大したりスランプ保持性能が低下したりすることも指摘されており、この性能を確保するためには、専用の AE 減水剤や高性能 AE 減水剤の開発が進められていることから、必要に応じて使用するのがよいと記述した。

製造時には、高炉スラグ微粉末の計量装置は高炉スラグ微粉末専用であることが望ましいことを明記している。また累加計量は原則としては行わないこととした。ただし、累加計量の印字記録が個別に出力でき、それぞれの

表-3 高炉スラグ微粉末の種類と置換率による湿潤養生期間の目安

置換率 (%)	30~40		40~60		60~70
高炉スラグ微粉末の種類	高炉スラグ微粉末 4000	高炉スラグ微粉末 3000	高炉スラグ微粉末 4000	高炉スラグ微粉末 6000	高炉スラグ微粉末 4000
日平均気温 (°C)					
15°C以上	6日以上	7日以上	7日以上	6日以上	8日以上
10°C以上	9日以上	9日以上	9日以上	8日以上	11日以上
5°C以上	12日以上	12日以上	12日以上	11日以上	14日以上

計測値が確認できる場合に限り、実施してよいことを解説に記述した。

4.5 養生

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、置換率が大きくなると養生の影響を大きく受けることが想定される。また、高炉スラグ微粉末の種類によっても湿潤養生日数の目安が変化すると想定して、表-3に示すような目安を設定した。この日数の根拠は、普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換した水結合材比45~55%のコンクリートにおいて、材齢28日に対する圧縮強度比が50%程度に達する材齢を目安として求めたものである。また、蒸気養生等の促進養生を施す場合には、過去の実施例等を十分に調査して、コンクリートの品質に悪影響を及ぼさないように、促進養生の開始時期を遅らせるとともに、促進養生後の湿潤養生期間を長くするなどの配慮が必要であることを解説に追記した。

4.6 各種コンクリート

マスコンクリートにおいては、高炉スラグ微粉末の粉末度や置換率によっては、温度依存性が高いために、水和が促進され温度上昇量が増加することも報告されている。打込み温度を低くするなどの工夫が必要である。一方で、近年では高炉スラグ微粉末の粒度を粗くして置換率を高め、セッコウの添加量を大きくした低発熱・低収縮型の高炉セメントB種も開発されていることから、適宜利用することなどを記載した。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの熱物性については、様々な結果が存在していることから、示方書に示されている参考値などを用いたり、別途検討をしたりすることで、適切に設定することを記述した。

寒中コンクリートにおいて、低温による強度発現が問題となる可能性もあるが、塩分や水和熱、アルカリシリカ反応に対する抵抗性を向上させるなどの目的で高炉スラグ微粉末を使用する場合も考えられるため、置換率や水結合材比の低減、養生方法等の対策を講じて適用できることを記載した。

最後に特殊なコンクリートとして用いる場合には、それぞれのコンクリートが要求する所要の品質を確保できるように、高炉スラグ微粉末の種類と置換率を適切に定めるとともに、コンクリートの配合、製造および施工を

適切に行う必要があることを記載した。

5. 資料編の充実

今回の改訂においては、これまで得られてきている研究成果を反映できるよう、資料編の充実を試みた。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの特性については、フレッシュから各種コンクリートまで、最新の知見を加えるために、多くの文献調査を実施した。そこから特に養生の影響や空隙特性、収縮特性などの結果を増強した。また中性化については、本文で記載の通り、促進および実環境での様々な結果を整理して、その差異などからk値の検討を加えている。また塩分浸透についても、最新の研究成果を調査して高炉スラグ微粉末を用いることのメリットを調査した。加えて、ASRに対する抵抗性や化学的浸食のうち耐硫酸塩性やDEFによる膨脹に対する抵抗性についても調査し、効果が認められていることを紹介している。

次に、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートによる耐久性確保・向上の事例をいくつか紹介している。塩分浸透やASRに対応するために利用されるに至った高炉スラグ微粉末を使用するにあたって、様々な取組みと注意点を紹介している。

最後に、高炉スラグ微粉末を対象とした最新技術として3つのセメントと1つの混和剤開発を紹介した。(1) 低発熱・低収縮型高炉セメントB種では、高炉スラグ微粉末3000を用いて置換率とセッコウ量を調整することで、マスコンクリートの温度ひび割れ対策を実現している。(2) 早強高炉セメントは、早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末6000を50%添加したり、高炉スラグ微粉末4000を30%添加したりすることで、早期強度を確保し、プレストレストコンクリートやプレキャストコンクリートへの適用を実現している。(3) 改良型の高炉セメントC種では、高炉スラグ微粉末4000を60%以上含有させ、結合材中のSO₃量を増加することで、初期強度および収縮特性について改善を図り、環境負荷低減と高炉スラグ微粉末の特徴を最大限引き出すことを実現している。(4) 高炉スラグ微粉末用化学混和剤の開発では、スランプ保持性能や粘性の低減化などを実現するための開発が行われている。

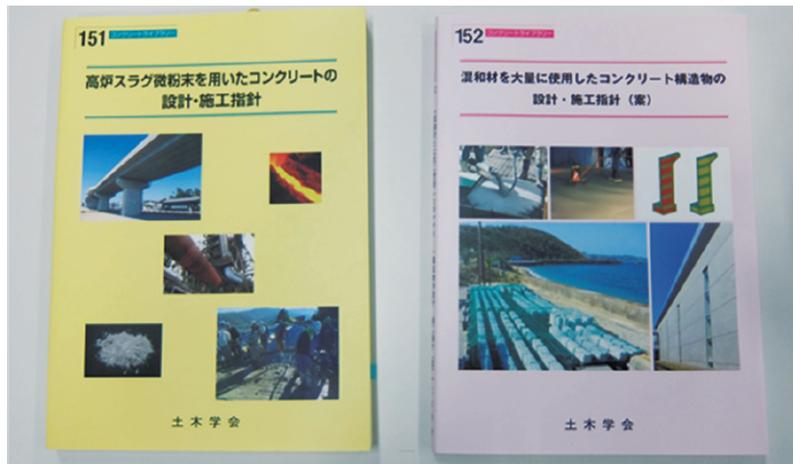


図-2 コンクリートライブラリー 151 & 152

6. まとめと今後の展望

以上、CL151「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針」の改訂概要について紹介した。高炉スラグ微粉末は、古くからコンクリートに利用されている産業副産物であり、日本ではいち早く実用化に至っている。今後、環境負荷低減を目指したコンクリートの検討に加え、更なる高炉スラグ微粉末の特徴を最大限生かしたコンクリートを開発し、広く利用していくことが必要になると考えている。一方で、新規材料のコンクリートでは、まだまだ実験データが不足しているところも多く、すぐには利用できない側面も存在する。2019年度から新たに土木学会に「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの品質・性能評価に関する調査研究小委員会（360委員会）：伊代田岳史委員長（芝浦工業大学）」を設立し、

データの取得を促すとともに、新規材料をどのように利用していくか、そのためにどのようなことを整備すべきかを中心に議論をスタートさせている。地球全体を考えると、産業副産物を上手に利用したコンクリート、その副産物が保有する特徴を最大限に引き出したコンクリートを用いていくことに、本指針が少しでもお役に立てることを祈っている。

謝辞 WG活動を支えていただいた、横浜国立大学 細田暁教授（品質・設計WG主査）、九州大学 佐川康貴准教授（材料・施工WG主査）、鐵鋼スラグ協会 檀康弘様（資料WG主査）ならびに委員各位の献身的な貢献に、心より御礼申し上げます。また、貴重なご意見を頂きました土木学会コンクリート委員会常任委員会の委員各位に謝意を表します。