

産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する
積雪寒冷地利用技術研究小委員会

報告書

平成 30 年 5 月

北海道土木技術会 コンクリート研究委員会

序

多様化するコンクリートへの要求品質，環境問題への意識の高まり，そして骨材事情の変化などを背景に，産業副産物の利用が増加している．また，最近はわが国の社会事情から端を発して，構造物建設における生産性の大幅な向上が目標とされている．このような目まぐるしい変化に対処するには，もはや従来の材料や工法では通用しない場合があり，新しい取り組みを進める必要がある．

「産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究小委員会」は，北海道土木技術会コンクリート委員会(委員長 上田多門 北海道大学大学院教授)内に設置され，2014年から2期4年間活動を行ってきた．コンクリート材料として利用可能な産業副産物は，研究段階のものや試行を含めて実用化されたものも多数ある中で，本研究委員会ではフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末について調査研究を開始した．これらは，日本工業規格(JIS)でその品質規格が長年にわたって整備され，比較的なじみ易い副産物であると判断されるにもかかわらず，あまり普及が進んでいないことが最大の理由であった．また，学協会から指針類が発刊され，これらに基づいて各地域の実情を反映したガイドラインや基準類が相次いで整備され，将来にわたる利用が推進される状況が形成されつつある．JISに準じたフライアッシュや高炉スラグ微粉末は，北海道でも製造されて使用もされてきた．今後，積雪寒冷地における厳しい気象環境を踏まえながら，これらを上手に使いこなし，コンクリート構造物の要求性能や建設業を取り巻く諸課題に対処することが望まれる．

最後に，本委員会活動にご尽力いただいた井上真澄幹事長はじめ，各作業部会の主査，副査および委員の方々にあらためてお礼申し上げたい．

2018年5月

北海道土木技術会コンクリート研究委員会
産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究小委員会
委員長 杉山 隆文

産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究小委員会

委員構成

(平成 29 年度)

委員長 杉山 隆文 北海道大学大学院
幹事長 井上 真澄 北見工業大学
幹事 志村 和紀 北海道大学大学院
幹事 寿楽 和也 (株)ドーコン

ワーキンググループ 1 (流通と仕組み)

主査 小野寺 収 北電興業(株)
副査 茂庭 孝司 北海道生コンクリート工業組合

委員

石塚 浩章 (株)上田商会	谷口 円 北方建築総合研究所
小野田一也 鹿島建設(株)	徳重 英信 秋田大学
笹岡 満 北海道電力(株)	服部 健作 北海道コンクリート技術センター
齋藤 敏樹 北電総合設計(株)	深瀬 孝之 伊藤組土建(株)
島多 昭典 北海道開発局	藤山 修 太平洋セメント(株)
菅田 紀之 室蘭工業大学	三木田洋一 日鉄住金セメント(株)
関谷 美智 北海道電力(株)	安中新太郎 寒地土木研究所

ワーキンググループ 2 (品質と技術開発)

主査 澤村 秀治 函館工業高等専門学校
副査 高野 智宏 共和コンクリート工業(株)

委員

石井めぐみ トーピー建設工業(株)	遠田 康英 岩田地崎建設(株)
大岡 和男 (株)大林組	花田 眞吉 中大実業(株)
金澤 隆之 大成建設(株)	本間 鉄也 日鉄住金セメント(株)
齋藤 裕俊 日本高圧コンクリート(株)	松林千佳史 (株)北未来技研
坂野 伸治 北海道	村山 陽 東日本高速道路(株)
定木 紳 清水建設(株)	吉野 伸一 ジェイアール北海道エンジニアリング(株)
鈴木 洋一 日本高圧コンクリート(株)	

産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究小委員会

委員構成

(平成 28 年度)

委員長 杉山 隆文 北海道大学大学院
幹事長 井上 真澄 北見工業大学
幹事 志村 和紀 北海道大学大学院
幹事 寿楽 和也 (株)ドーコン

ワーキンググループ 1 (流通と仕組み)

主査 小野寺 収 北電興業(株)
副査 新崎 義幸 北海道生コンクリート工業組合

委員

石塚 浩章 (株)上田商会	谷口 円 北方建築総合研究所
遠藤 達哉 北海道開発局	徳重 英信 秋田大学
小野田一也 鹿島建設(株)	服部 健作 北海道コンクリート技術センター
齋藤 敏樹 北電総合設計(株)	深瀬 孝之 伊藤組土建(株)
坂下 公一 (株)北海道宇部	藤山 修 太平洋セメント(株)
島多 昭典 北海道開発局	三木田洋一 日鉄住金セメント(株)
菅田 紀之 室蘭工業大学	安中新太郎 寒地土木研究所
関谷 美智 北海道電力(株)	

ワーキンググループ 2 (品質と技術開発)

主査 澤村 秀治 函館工業高等専門学校
副査 高野 智宏 共和コンクリート工業(株)

委員

石井めぐみ ドーピー建設工業(株)	花田 眞吉 中大実業(株)
大岡 和男 (株)大林組	坂野 雅人 北海道
金澤 隆之 大成建設(株)	本間 鉄也 日鉄住金セメント(株)
齋藤 裕俊 日本高圧コンクリート(株)	松林千佳史 (株)北未来技研
定木 紳 清水建設(株)	村山 陽 東日本高速道路(株)
鈴木 洋一 日本高圧コンクリート(株)	吉野 伸一 ジェイアール北海道エンジニアリング(株)
遠田 康英 岩田地崎建設(株)	

産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究小委員会

委員構成

(平成 27 年度)

委員長 杉山 隆文 北海道大学大学院
幹事長 井上 真澄 北見工業大学
幹事 志村 和紀 北海道大学大学院
幹事 寿楽 和也 (株)ドーコン

ワーキンググループ 1 (流通と仕組み)

主査 小野寺 収 北電興業(株)
副査 新崎 義幸 北海道生コンクリート工業組合

委員

石塚 浩章 (株)上田商会	徳重 英信 秋田大学
小野田一也 鹿島建設(株)	服部 健作 北海道コンクリート技術センター
齋藤 敏樹 北電総合設計(株)	深瀬 孝之 伊藤組土建(株)
島多 昭典 寒地土木研究所	藤山 修 太平洋セメント(株)
菅田 紀之 室蘭工業大学	三木田洋一 日鉄住金セメント(株)
関谷 美智 北海道電力(株)	山本 英樹 (株)北海道宇部
谷口 円 北方建築総合研究所	和田 忠幸 北海道開発局

ワーキンググループ 2 (品質と技術開発)

主査 澤村 秀治 函館工業高等専門学校
副査 高野 智宏 共和コンクリート工業(株)

委員

石井めぐみ ドーピー建設工業(株)	坂野 雅人 北海道
大岡 和男 (株)大林組	古道 宣行 大成建設(株)
齋藤 裕俊 日本高圧コンクリート(株)	本間 鉄也 日鉄住金セメント(株)
定木 紳 清水建設(株)	松林千佳史 (株)北未来技研
鈴木 洋一 日本高圧コンクリート(株)	村山 陽 東日本高速道路(株)
遠田 康英 岩田地崎建設(株)	吉野 伸一 北海道ジェイアール・コンサルタンツ (株)
花田 眞吉 中大実業(株)	

産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究小委員会

委員構成

(平成 26 年度)

委員長 杉山 隆文 北海道大学大学院
幹事長 井上 真澄 北見工業大学
幹事 志村 和紀 北海道大学大学院
幹事 寿楽 和也 (株)ドーコン

ワーキンググループ 1 (流通と仕組み)

主査 高橋 昌之 北電興業(株)
副査 新崎 義幸 北海道生コンクリート工業組合

委員

池田 隆 鹿島建設(株)	菅田 紀之 室蘭工業大学
石塚 浩章 (株)上田商会	谷口 円 北方建築総合研究所
小野田一也 鹿島建設(株)	徳重 英信 秋田大学
加藤 政治 北海道電力(株)	服部 健作 北海道コンクリート技術センター
城所 卓明 太平洋セメント(株)	三木田洋一 日鉄住金セメント(株)
齋藤 敏樹 北電総合設計(株)	山本 英樹 (株)北海道宇部
島多 昭典 寒地土木研究所	和田 忠幸 北海道開発局

ワーキンググループ 2 (品質と技術開発)

主査 澤村 秀治 函館工業高等専門学校
副査 高野 智宏 共和コンクリート工業(株)

委員

石井めぐみ ドーピー建設工業(株)	花田 眞吉 中大実業(株)
大岡 和男 (株)大林組	古道 宣行 大成建設(株)
齋藤 裕俊 日本高圧コンクリート(株)	松林千佳史 (株)北未来技研
定木 紳 清水建設(株)	村山 陽 東日本高速道路(株)
田中 浩之 北海道	吉野 伸一 北海道ジェイアール・コンサルタンツ(株)
遠田 康英 岩田地崎建設(株)	

**産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究小委員会
報告書目次**

1章 はじめに	1
2章 北海道におけるフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末	3
2.1 フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末の変遷	3
2.2 フライアッシュ	3
2.2.1 生産と流通	3
2.2.2 品質	6
2.2.3 利用状況	7
2.2.4 寒冷地のコンクリート性状に与える影響	9
2.3 高炉スラグ微粉末	25
2.3.1 生産と流通	25
2.3.2 品質	27
2.3.3 利用状況	27
2.3.4 寒冷地のコンクリート性状に与える影響	30
3章 アンケート調査	34
3.1 アンケートの目的	34
3.2 アンケート集計結果	34
3.2.1 第1回アンケート集計結果	34
3.2.2 第1回アンケート集計結果の総括	44
3.2.3 第2回アンケート集計結果	45
3.2.4 第2回アンケート集計結果の総括	68
3.3 アンケート結果の分析と課題および今後の展望と提言	69
3.3.1 材料供給者の立場から	69
3.3.2 製造者の立場から	70
3.3.3 施工者の立場から	71
3.3.4 設計者の立場から	73
3.3.5 発注者の立場から	75
3.3.6 研究者の立場から	76
4章 産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する最近の取り組み	80
4.1 環境負荷低減の観点	80
4.2 品質・性能向上の観点	81
4.3 新しい利用方法	82

資料集

資料 1	石灰灰の発生過程	85
資料 2	コンクリート用フライアッシュの品質基準(JIS A 6201 : 2015)	86
資料 3	フライアッシュコンクリートの利用方法による水セメント比の相違について	87
資料 4	フライアッシュコンクリートの利用拡大に向けた全国の事例	88
資料 5	高炉スラグ微粉末の発生過程	89
資料 6	コンクリート用高炉スラグ微粉末の品質基準(JIS A 6206 : 2013)	90
資料 7	高炉セメント B 種を用いた厳冬期の施工	91
資料 8	北海道での使用事例集	92
1.	フライアッシュ	
1-1	吹付けコンクリート	93
1-2	覆工コンクリート	95
1-3	LNG 地上式貯槽	97
1-4	プレキャストコンクリート製品(道路用製品)	101
1-5	建物基礎	103
2.	高炉スラグ微粉末(高炉セメント)	
2-1	ポストテンションセグメント方式 PC 単純 T 桁橋	105
2-2	鉄筋コンクリート橋脚基礎	107
資料 9	フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末に関する文献集	109
資料 10	委員会で実施したアンケート	117

1章 はじめに

コンクリートに使用される結合材は、その容積の1割程度に過ぎないが、強度や耐久性などの性質を支配する重要な役割を担っている。結合材はセメントの他に混和材を含んでいるが、通常コンクリートの結合材と言えば、セメントだけである場合がほとんどある。日本工業規格(JIS)には、ポルトランドセメントの他に、産業副産物起源のフライアッシュや高炉スラグ微粉末などを用いた混合セメントも規定されている。図 1.1 は、2015 年におけるわが国のセメント種別の生産割合を示している。普通ポルトランドセメントが7割、次に高炉セメントが2割であり、これら2種で9割を占めており、この傾向は長い間変わっていない。すなわち、要求される品質にもかかわらず、わが国で使用されているあらゆるコンクリートの結合材が固定されている。これは、多様なコンクリートについて、ほとんど配合や化学混和剤だけでその要求性能に対応していることを意味する。

フライアッシュや高炉スラグ微粉末は、代表的な混和材でありコンクリート用混和材として JIS で規定されている。表 1.1 は、結合材を構成する産業副産物起源の混和材とセメントの種類である。しかし、結合材の一部としての混和材の利用は限定的である。一方で、これらの産業副産物は、環境側面での優位性が示されている。二酸化炭素排出量の算出では、これら産業副産物の排出量はカウントされず、セメントを代替する分だけ結果的に、コンクリート材料の製造に伴う排出量を減じることができる。また、フレッシュ時の性状や硬化後の性能に対して、より効果的にこれらを向上することができる。したがって、結合材の種類やその組み合わせおよび使用量を加えた配合設計の自由度を著しく高めることができるのである。

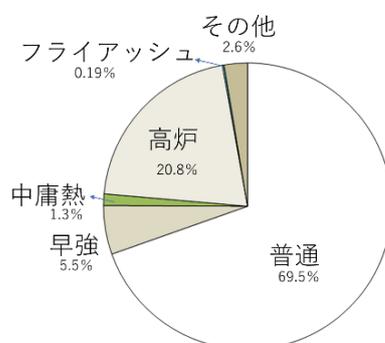


図 1.1 セメント種別の利用割合(2015年)

表 1.1 産業副産物起源の混和材とセメントの組み合わせ

結合材	
セメント	混和材 (産業副産物起源)
① ポルトランドセメント : JIS R 5210	① フライアッシュ : JIS A 6201
② 高炉セメント : JIS R 5211	② 高炉スラグ微粉末 : JIS A6206
③ シリカセメント : JIS R 5212	③ シリカフェーム : JIS A6207
④ フライアッシュセメント : JIS R 5213	
⑤ エコセメント : JIS R 5214	

フライアッシュや高炉スラグ微粉末は、施工時の流動性が向上することや水和熱を低減でき、コンクリート構造物の耐久性も高める優れた結合材である。しかし、配合によっては普通ポルトランドセメント単味を用いた時よりも強度発現性が緩慢であり、養生期間が長くなる。また、北海道のような積雪寒冷地に不可欠な耐凍害性を確保するための技術的な課題とその対処法の理解が必要である。さらに、フライアッシュや高炉スラグ微粉末を供給する地域は限られており、広大な北海道での流通の現状を明らかにしておく必要がある。

そこで、本研究委員会では北海道における次のことを調査する目的で活動を行った。

- (1) フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の供給や流通ならびに品質の実態
- (2) 積雪寒冷地での利用に関連するコンクリートの品質
- (3) フライアッシュコンクリートおよび高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートに対する理解

JIS規格に準じたフライアッシュは、北海道電力が製造、供給して、これまで主としてダムコンクリートや吹付けコンクリートで用いられてきたが、フライアッシュセメントや混和材としての利用は限られている。しかし、最近では、同じ積雪寒冷地である東北や北陸をはじめ、フライアッシュよりも高炉スラグの供給が比較的盛んであると思われる九州、亜熱帯気候である沖縄まで、全国的にフライアッシュコンクリートに関する標準化が活発であり、橋梁などの大規模土木構造物への使用も増えている。このような状況で、北海道におけるフライアッシュの実態を把握しておく意義はある。同様に、高炉セメントは、北海道においても幅広く利用されている混合セメントであるが、高炉スラグ微粉末としての混和材利用の実態を比較しながら把握する必要がある。

少子高齢化によって担い手不足が進み、さらに働き方改革に取り組むわが国の建設業界において、コンクリート構造物の生産性向上は早急に対応すべき課題である。すなわち、社会構造が大きく変化する中で、従来通りの手法ではもはや通用しない場合が考えられる。コンクリートに関しては、土木用コンクリートのスランプが8cmから12cmへ増加されたことに加えて、施工性を著しく高め、省力化できる高流動コンクリートやプレキャストコンクリートの採用、埋設型枠の利用などの対応が考えられる。粉体系高流動コンクリートでは、フライアッシュの利用実績も報告されている。また、北海道の高速道路トンネルの覆工コンクリートに対して、高流動コンクリートに比べて流動性は劣るものの「中流動コンクリート」にフライアッシュが採用された実績もある。さらに、プレキャストコンクリートの製造では、養生管理が容易であり、品質を確保したうえで工場内の施工性を改善できるフライアッシュの利用が進むと期待される。高炉スラグ微粉末を用いたプレキャストPCは、北海道を含めて実績があり、厳しい環境下での使用に耐える性能を著しく高めたコンクリート部材の製造に寄与すると思われる。

コンクリートは、社会インフラに多量に利用される建設主幹材料である。そして社会要請が多様化する中で、ようやくわが国においてもコンクリート材料の選択肢が大きく拡大しようとしている。本研究委員会の成果が、北海道における新たな仕組みづくりを議論するきっかけになることを期待する。

2章 北海道におけるフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末

2.1 フライアッシュ、高炉スラグ微粉末の変遷^{1), 2)}

北海道において高炉セメントが製造されたのは、昭和18年～21年の一時期を除き、昭和30年富士セメント(現日鉄住金セメント)が桂沢ダム向けに製造開始したのが最初である。一方コンクリート用フライアッシュの製造は、北海道電力滝川発電所で昭和37年に開始したのが始まりで、翌年には江別発電所、また昭和46年には奈井江発電所でも製造が始まった。当時は高炉セメントと同様フライアッシュセメントが広く流通しており、フライアッシュの供給量は年間最大13万t(昭和48年度)にも達した。

昭和50年代後半から燃料が国内炭から海外炭へシフトし、国内炭火力の廃止によりフライアッシュの製造量が減少する一方、海外炭フライアッシュは未燃焼カーボンや炭種による品質変動等のためその品質が低下した。このことから、平成初期にはコンクリート用フライアッシュの供給量が大幅に減少し、混合セメントの需要は高炉セメントへと転換が進んだ。現在では北海道の総セメント需要の約20%が高炉セメントである。

海外炭火力によるコンクリート用フライアッシュ(JIS 灰)の製造は、平成14年に運転を開始した北海道電力苫東厚真発電所4号機(最大出力70万kW)に製造設備が設置されたことで平成16年度から開始され、道内におけるJIS 灰の出荷体制が回復した。現在北海道において流通しているコンクリート用フライアッシュは、苫東厚真発電所で生産されるJIS A 6201のフライアッシュII種に該当する。

2.2 フライアッシュ

2.2.1 生産と流通

(1) 苫東厚真発電所の石炭灰発生量と有効利用状況

苫東厚真発電所の石炭灰発生量の推移を図2.2.1に示す。年間40～50万tの石炭灰が発生しており、このうち約96%が有効利用されている。

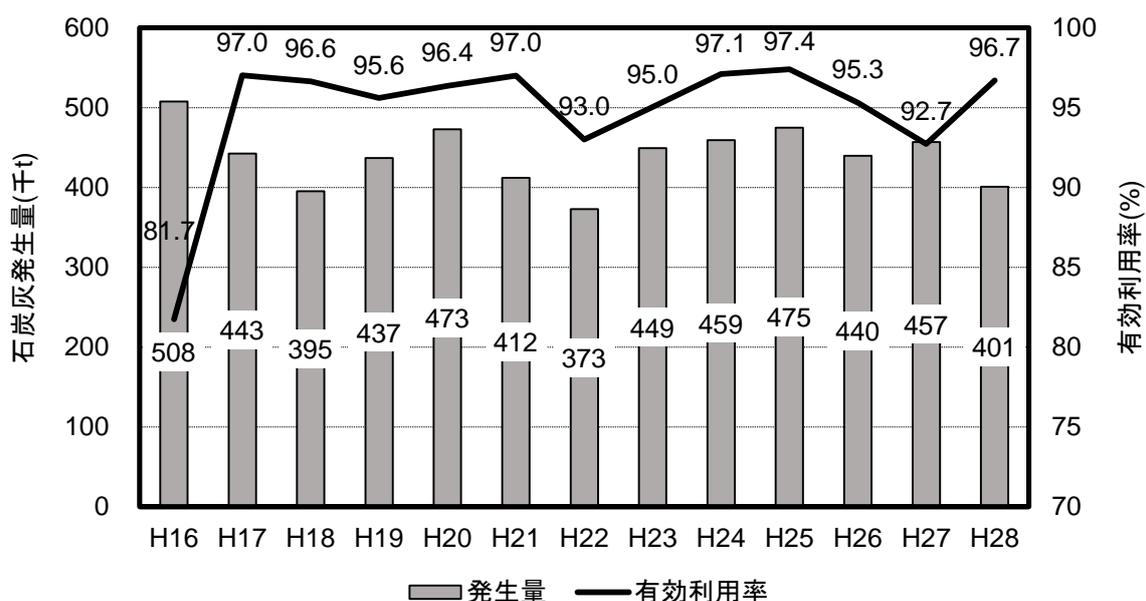


図 2.2.1 苫東厚真発電所の石炭灰発生量と有効利用率の推移

平成 28 年度には 401 千 t の発生量のうち 96.8% にあたる 388 千 t が有効利用された。有効利用の内訳は、図 2.2.2 に示すとおりである。

セメント原料(粘土代替)としての利用が 46.9% と最も多く、次いで路盤材が 31.2% となっている。一方でフライアッシュコンクリート用 JIS 灰の利用は、10.2% にとどまっている。

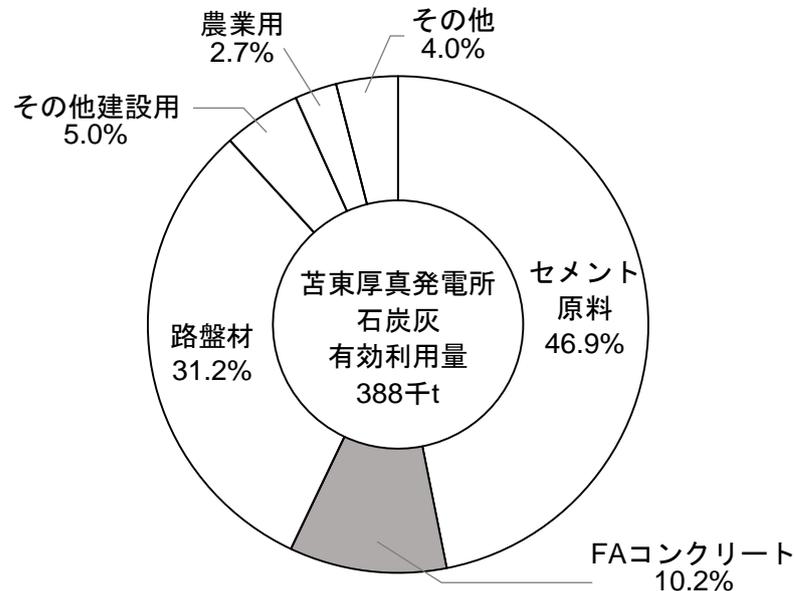


図 2.2.2 苦東厚真発電所石炭灰の有効利用内訳(平成 28 年度)

(2) フライアッシュの製造

苦東厚真発電所におけるフライアッシュの製造は、数十炭種におよぶ燃料炭から安定した品質のフライアッシュを製造するため、ブレンディングサイロ(2,500m³×2 基)を活用している点が特徴である。

電気式集じん器で回収されたフライアッシュ原粉と、原粉を分級した細粉をブレンディングサイロで混合処理することで、ブレン比表面積を許容幅内(4,000±350cm²/g)に収めるとともに、1ロット 2,500t 単位で均質化を図っている。

(3) フライアッシュの流通²⁾

苦東厚真発電所で製造されたフライアッシュは、製品の安定供給を図るため一旦発電所近郊の製品貯蔵サイロ(6,500t×2 基+2,500t×1 基)に運搬貯蔵されたのち、出荷される。

コンクリート用混和材へ向けては、製品貯蔵サイロから道内一円の生コン工場、工場製品製造者、建設現場などのユーザーに直接陸送される。フライアッシュセメント向けは、フライアッシュを道内のセメント工場に陸送され、混合セメントとして使用されている。

コンクリート用フライアッシュの出荷状況を図 2.2.3 に示す。最近では、フライアッシュセメントとしてのダム建設および生コン工場での混和材としての利用が増加した。平成 25 年度から平成 28 年度の 4 年間の実績によると、フライアッシュの混和材利用が全体の 6~7 割程度で推移している。出荷量は、生コンやプレキャスト製品といった恒常的な需要としては少なく、ダム建設のような比較的大規模なプロジェクトの有無で大きく増減する。したがって、需要拡大に向けては恒常的な需要を底上げすることが望まれる。

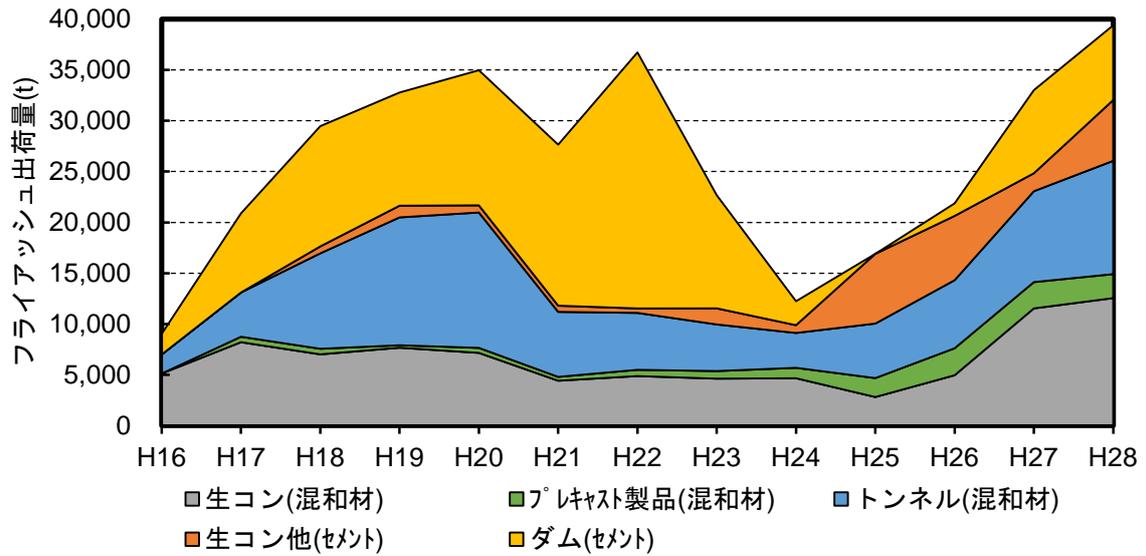


図 2.2.3 北海道におけるコンクリート用フライアッシュの出荷実績

コンクリート用フライアッシュ利用者の位置的分布(平成 29 年 4 月現在)を図 2.2.4 に示す。ダムは中庸熱フライアッシュセメント，また生コンの一部はフライアッシュセメントとしての利用である。フライアッシュコンクリートを JIS 認証している生コン工場は徐々に増えて，平成 29 年 4 月現在 40 工場となっている。

フライアッシュは，道央圏を中心として全道に流通し様々な用途に利用されている。

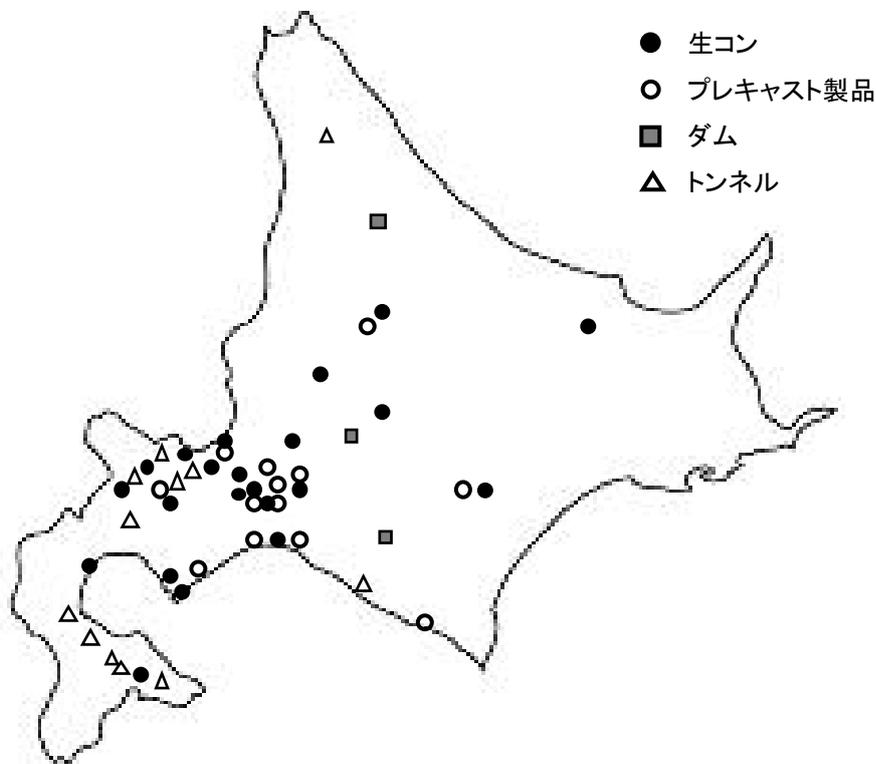


図 2.2.4 フライアッシュ利用者の分布

2.2.2 品質

苫東厚真発電所4号機の原粉と JIS II 種品で JIS A 6201 品質項目の試験データを比較した結果を図 2.2.5 に示す²⁾。なお、図中には各データの範囲とともにプロットは平均値を示している。

原粉は炭種の影響を大きく受け、各項目とも変動幅が大きく、活性度指数が規格値を下回るものもある。これに対して JIS II 種品は全ての項目で規格値を満足している。

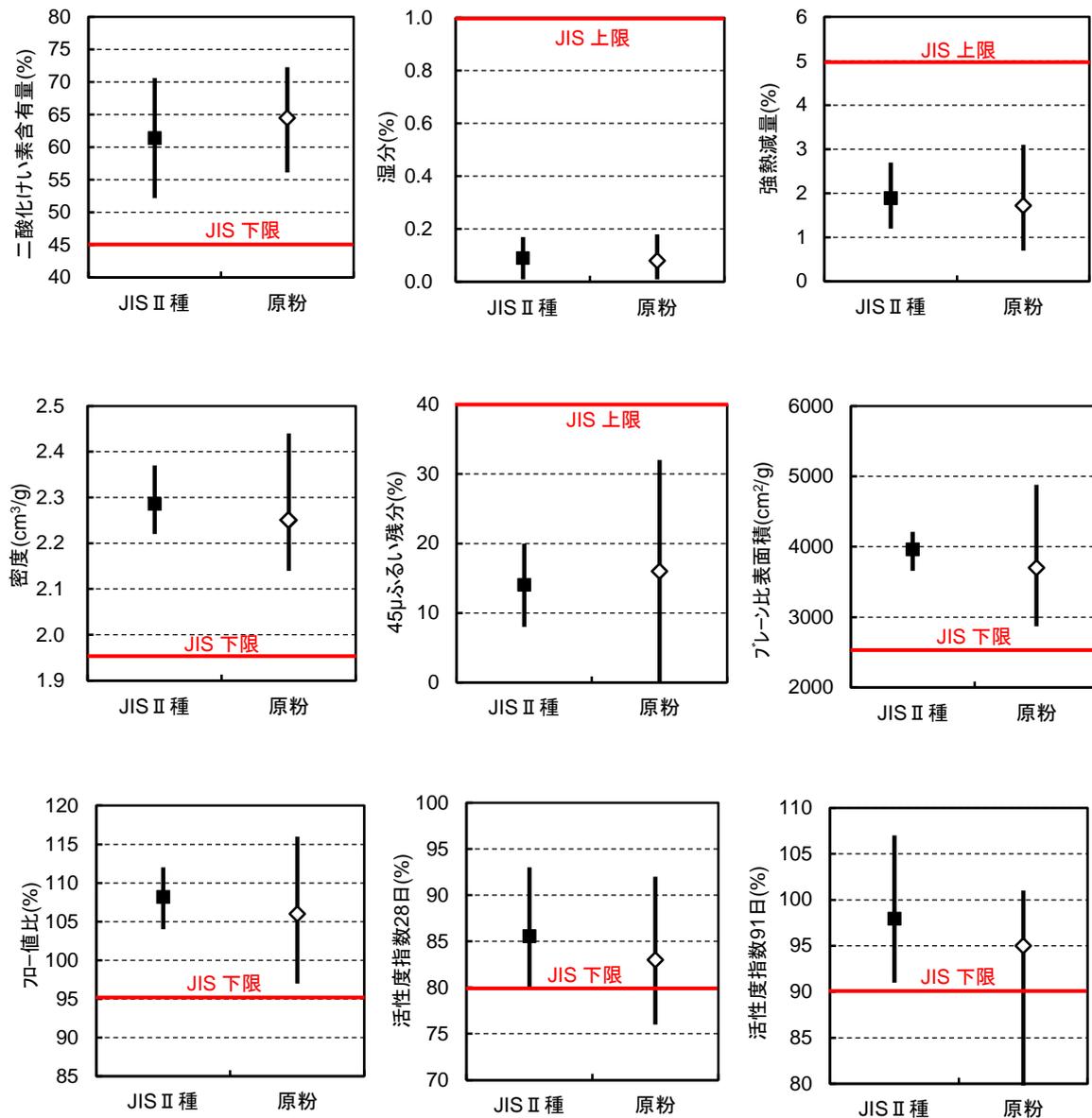


図 2.2.5 原粉と JIS II 種品の品質比較(苫東厚真発電所 4 号機)

また、コンクリートの空気量への影響指標といわれるメチレンブルー吸着量の平成 26~28 年度の変動状況を図 2.2.6 に示す。メチレンブルー吸着量は 0.35~0.63 mg/g で推移しており、標準偏差範囲は 0.50 ± 0.10 mg/g となっている。

フライアッシュがコンクリートの空気量や耐凍害性に与える影響については、2.2.4 で述べる。

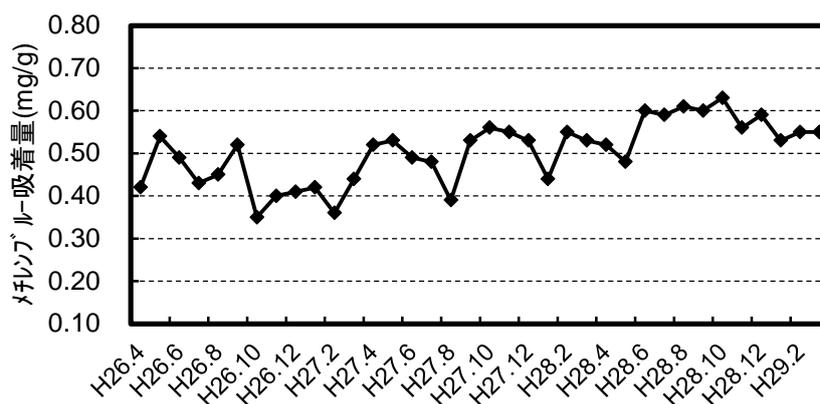


図 2.2.6 苫東厚真発電所 JIS II 種品のメチレンブルー吸着量の推移

2.2.3 利用状況

(1) 主な利用実績

苫東厚真発電所4号機からフライアッシュを出荷開始した平成16年度以降の北海道におけるフライアッシュコンクリートの主な利用実績は、表 2.2.1 に示すとおりである。

表 2.2.1 北海道におけるフライアッシュコンクリートの主な利用実績

年度	工事名等	発注者	利用方式	概略コンクリート量 (m ³)	概略 FA 量 (t)
H16～H20	泊発電所3号機建設	北海道電力	A	263,200	16,500
H19～H25	京極発電所建設	北海道電力	A	170,900	12,100
H25～H26	新岩松発電所建設	北海道電力	C	13,300	700
H27～H28	石狩湾発電所, LNG 基地建設	北海道電力	A,C	92,000	5,500
H16～H20	徳富ダム建設	北海道開発局	C	530,000*	31,800
H19～H24	夕張シューパロダム建設	北海道開発局	C	895,000	60,000
H20～H22	当別ダム建設	北海道	C	139,000	7,800
H27～H28	厚幌ダム建設	北海道	C	182,500*	7,300
H28	サンルダム建設	北海道開発局	C	65,000*	3,900
H28	平取ダム建設	北海道開発局	C	21,700*	1,300
H23～H24	シューパロ発電所建設	北海道企業局	C	16,400	900
H16～H28	国道トンネル建設(吹付け)	北海道開発局	A	521,300*	41,700
H16～H28	高速道路トンネル建設(吹付け)	東日本高速道路	A	351,300*	28,100
H20～H28	道道トンネル建設(吹付け)	北海道	A	77,500*	6,200
H21～H28	高速道路トンネル建設(覆工)	東日本高速道路	A	54,000	5,400
H27～H28	新幹線トンネル建設(吹付け)	鉄道運輸機構	A	171,300*	13,700
H19～H21	札幌駅前地下通路建設	札幌市	A,C	22,900	1,200
H18～H20	T病院建築	民間	C	6,700	300
H19	I病院建築	民間	C	8,200	400
H19	H医療センター建築	民間	A	6,200	300
H19～H20	Nオフィスビル建築	民間	A	9,800	500
H24	Mオフィスビル建築	民間	A	35,100	1,800
H26	T会新病院建築	民間	C	14,500	800
H26	Tメガソーラー建設	民間	A	17,000	900
H27～H28	S市街地再開発事業	民間	A	61,200	3,300
H27	T病院建築	民間	C	5,900	400
H28	M工場建築	民間	A	6,000	400
H16～H28	プレキャスト製品	民間	A	235,000*	14,100

注) 利用方式欄の A は混和材方式, C はセメント方式を示す。

*印を付した概略コンクリート量は、想定フライアッシュ配合量からの算定値

(2) 特徴的な利用方法

フライアッシュは、コンクリート用混和材として様々な特徴を有しており、その特徴を活用してコンクリートの諸性状を改善することができる。フライアッシュの特徴を活かした利用方法の事例を表 2.2.2 に示す。また、具体的使用事例については巻末資料集で紹介する。

表 2.2.2 フライアッシュの特徴を活かした利用方法事例

種 類	利用方法	活かされた特徴	内 容
生コンクリート	低強度配合コンクリートの練上がり性状改善	材料分離抵抗性 球形微粒子	単位セメント量の少ない低呼び強度配合コンクリートに適量使用することで粉体量を確保し、粘性を付与して練上がり性状を改善できる。
	マスコンクリートのひび割れ対策	水和熱抑制 ポゾラン反応	設計材齢を長期に設定することでポゾラン反応を効果的に利用し、セメント量の低減により水和熱の抑制効果が大きくなる。
	トンネル覆工コンクリートの充填性向上	材料分離抵抗性 球形微粒子	中流動コンクリートの粉体として適量を使用することで、セメントを増量することなくコンクリートに適度な粘性と流動性を付与できる。
プレキャスト製品	高流動コンクリート用粉体	材料分離抵抗性 球形微粒子	高流動コンクリートに必要な粉体をセメントだけで確保すると必要以上に強度が高くなる場合に適量混和することで、セメント量の低減が図れる。
	バイコン骨材の粒度調整用粉体	粒度	バイコン中の骨材容積が極力大きくなるよう粒度調整するための粉体として有効である。
吹付けコンクリート	トンネル吹付けコンクリートの粉塵低減材	粘性付与	適量を混和することでコンクリートの粘性が増加し、コンクリート吹付け時のリバウンドや粉塵を低減できる。
ダムコンクリート	ダムコンクリートのひび割れ対策	水和熱抑制 ポゾラン反応	水和熱による温度応力低減のため、一般に中庸熱フライアッシュセメントが使用されている。

2.2.4 寒冷地のコンクリート性状に与える影響

(1) 空気量

コンクリートの空気量は、フレッシュコンクリートのワーカビリティや硬化コンクリートの耐凍害性に影響を与えるものである。したがって、フレッシュコンクリートに適切な空気量が確保されている必要がある。

一般にコンクリートの空気量は、エントラップトエアとエントレインドエアに大別されている。エントラップトエアは、コンクリートの練混ぜ時にモルタル内に閉じ込められた比較的大きな空気泡(気泡径 $100\mu\text{m}$ 程度以上)³⁾であり、コンクリート中に0.2~2%程度入っているとされている。他方、エントレインドエアは、練混ぜ時に AE 剤などを添加することによりコンクリート中に均等に分布させた微細な独立した空気泡(気泡径 $10\mu\text{m}$ ~ $300\mu\text{m}$ 程度が多い)³⁾である。エントラップトエアはコンクリートの品質の改善に効果は示さないが、エントレインドエアはワーカビリティなどのフレッシュ性状の改善とともに、硬化コンクリートの耐凍害性を大きく改善するものである。

フレッシュコンクリートの空気量に影響を与えるのは、AE 剤などの主成分および添加量、細骨材の品質および細骨材率、混和材の品質および混和量などである。一般にコンクリートは、AE 減水剤を一定量添加し、AE 剤により空気量を調整して使用される。ただし多くの場合、AE 剤は AE 減水剤にあらかじめ添加されていることが多く、混和剤メーカーでは、多くの場合 1%の空気量を調整する量を 1A と呼び、「2A の AE 減水剤」のような表現をしていることが多い。

高炉スラグ微粉末をコンクリートに混和した場合は混和しない場合より、所定の空気量を確保する AE 剤添加量は若干多くなるが、大きく変動することは少ない。一方、フライアッシュを混和した場合は混和しない場合より、所定の空気量を確保する AE 剤添加量は多くなる。したがって、AE 剤があらかじめ添加されている AE 減水剤を使用する場合には留意する必要がある。

1) フライアッシュの品質と空気量

フライアッシュの品質のうちコンクリートの空気量に影響を与える項目は、JIS 項目では強熱減量が多い。他に JIS 項目ではないが、最も相関性が高いとされているのがメチレンブルー吸着量である。強熱減量とメチレンブルー吸着量の関係は、正比例関係であることが知られている⁴⁾。

メチレンブルー吸着量が異なる 6 種類のフライアッシュを使用して、配合を一定としたコンクリートのフレッシュ性状について測定した結果⁵⁾のうち、メチレンブルー吸着量と空気量の関係を、図 2.2.7 に示す。

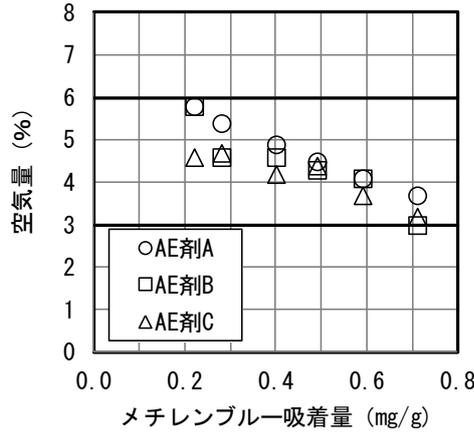


図 2.2.7 メチレンブルー吸着量と空気量の関係の一例⁵⁾

図 2.2.7 より，メチレンブルー吸着量が 0.2~0.7mg/g の範囲において，メチレンブルー吸着量の増加にしたがい空気量が減少傾向にあることが認められる．しかし，メチレンブルー吸着量がこの範囲においては，所定空気量の範囲である $4.5 \pm 1.5\%$ になっていることも確認できる．

2) 混和剤種類の影響

混和剤のうち空気量を調整する際に使用する AE 剤の成分は，混和剤種類により異なることが知られている．近年では，混和材を使用しない配合に使用されている一般用とフライアッシュを混和した配合に使用されているフライアッシュ用が製造されている．多くの製品の場合，フライアッシュ用は，一般用より添加量は多くなるが，空気量の確保が安定しているとされている．

同一フライアッシュにおいて，種類の異なる一般用 AE 剤とフライアッシュ用 AE 剤を用いたコンクリートのフレッシュ性状および経時変化について測定した結果⁶⁾のうち，使用した混和剤の主成分を表 2.2.3 に，所定の空気量が得られる AE 剤添加率を図 2.2.8 に示す．

表 2.2.3 使用した混和剤の主成分

種類	主成分
A	AE減水剤 リグニンスルホン酸系
	AE剤汎用 アルキルエーテル系
	AE剤FA用 アルキルカルボン酸系
B	AE減水剤 リグニンスルホン酸系
	AE剤汎用 アルキルエーテル系
	AE剤FA用 ロジン系
C	AE減水剤 オキシカルボン酸系
	AE剤汎用 アルキルエーテル系
	AE剤FA用 ロジン系
D	AE減水剤 リグニンスルホン酸系
	AE剤汎用 アルキルエーテル系
	AE剤FA用 アルキルエーテル系
E	AE減水剤 リグニンスルホン酸系
	AE剤汎用 アルキルエーテル系
	AE剤FA用 アルキルエーテル系
F	AE減水剤 リグニンスルホン酸系
	AE剤汎用 ロジン系
	AE剤FA用 アルキルエーテル系

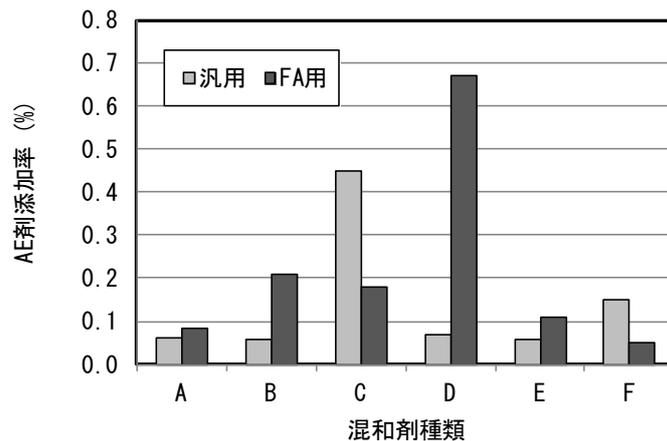


図 2.2.8 混和剤種類による添加率の相違の一例⁶⁾

図 2.2.8 より、混和剤の種類により所定の空気量(4.5%)が得られる添加率が異なることが認められる。

3) 経時変化

空気量の経時変化について、室内試験と実機試験の例を図 2.2.9～図 2.2.11 に示す。

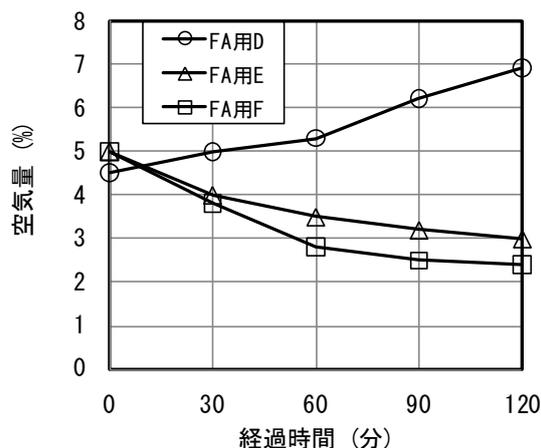
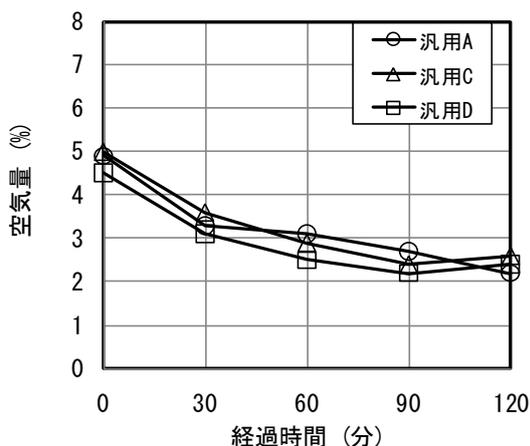


図 2.2.9 混和剤種類による空気量の経時変化の一例(室内試験)⁶⁾

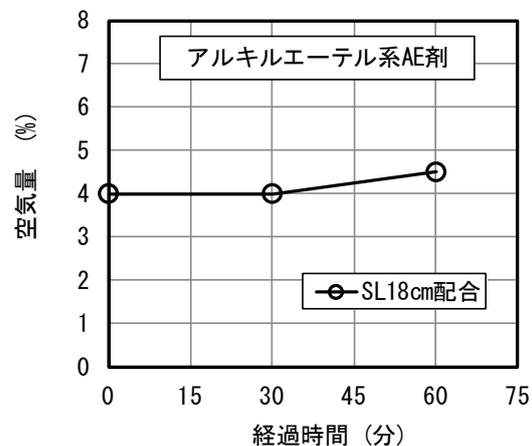
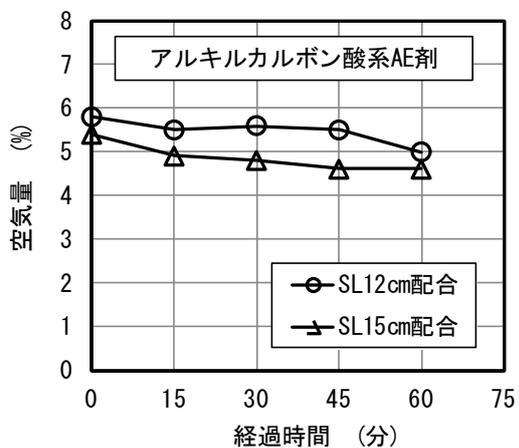


図 2.2.10 空気量の経時変化の一例(実機試験)⁷⁾ 図 2.2.11 空気量の経時変化の一例(実機試験)⁸⁾

図 2.2.9 より、混和剤の種類により空気量の経時変化が異なり、汎用の AE 剤より FA 用の AE 剤を使用した方が 30 分経過までの経時変化は少ない傾向にあることが認められる。

図 2.2.10 および図 2.2.11 より、実機のアジテート車を使用した空気量の経時変化は室内試験結果と異なり、60 分経過においても空気量の変化は 1% 程度であることが分かる。

室内試験と実機試験の相違は、試験に用いたコンクリート量の影響が要因の一つとして考えられる。室内試験(室温 20°C)では、コンクリート量 50L を静置して実施したため、測定毎に練混ぜスコップ、ハンドスコップおよびエアメーターなどに付着するペースト量の割合が多く、経過時間にしたがってペースト量が減少することが影響したものと考えられる。他方、実機試験のアジテート車ではコンクリート量は 1m³ 以上での測定を行っており、相対的にペースト量の減少は少ないことが考えられる。また、アジテート車ではゆっくりではあるがコンクリートは常に動いており、測定前には高速で攪拌されているため材料分離が生じにくくコンクリート性状の変化が室内試験の結果より小さくなったものと考えられる。

近年では、AE 減水剤および AE 剤が改良されて、空気量の経時変化が少ない混和剤もあり、材料や配合などに適した混和剤を選定することで、空気量の変動を少なくすることも可能である。

(2) 強度発現

1) 一般的性質

フライアッシュを結合材の一部として内割置換で混和すると、フライアッシュ置換率が増加するにしたがって初期強度発現は緩慢になる。初期強度発現の遅延は主としてフライアッシュ置換によるセメント量の減少に起因する。一方で、フライアッシュのポゾラン反応は緩やかに、長期にわたって継続するため、長期強度はプレーンコンクリートと同等、あるいはそれ以上の値を示すようになる。

既往の研究においてフライアッシュを混和したコンクリートの強度発現特性の例⁹⁾を図 2.2.12 に示す。この例では、4 種類のフライアッシュを使用し、スランプ 12±1cm, W/(C+F)=60% とし、コンクリートの圧縮強度と材齢の関係がフライアッシュ置換率別に示されている。フライアッシュの混和によって材齢 28 日までは強度が低下するものの、フライアッシュ置換率が 20% 以下であれば、材齢 91 日ではプレーンコンクリートと同等の強度が得られるとしている。

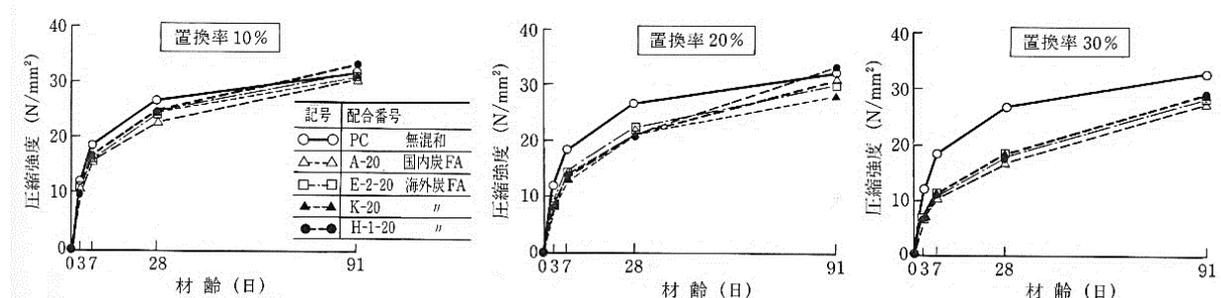


図 2.2.12 材齢と圧縮強度の関係⁹⁾

国内炭フライアッシュの置換率とコンクリートの圧縮強度の関係を単位結合材量別に示した例¹⁰⁾を図 2.2.13 に示す。フライアッシュを混和すると、フライアッシュの持つボールベアリング効果によって同一スランプを得るための単位水量を低減することができ、水結合材比を等しく設定

すれば、単位結合材量を小さくすることができる。この例では、置換率 30%の場合でも材齢 91 日以降の長期強度はプレーンコンクリートを上回っており、単位結合材量が小さくなるほど長期強度の発現性が向上することが示されている。

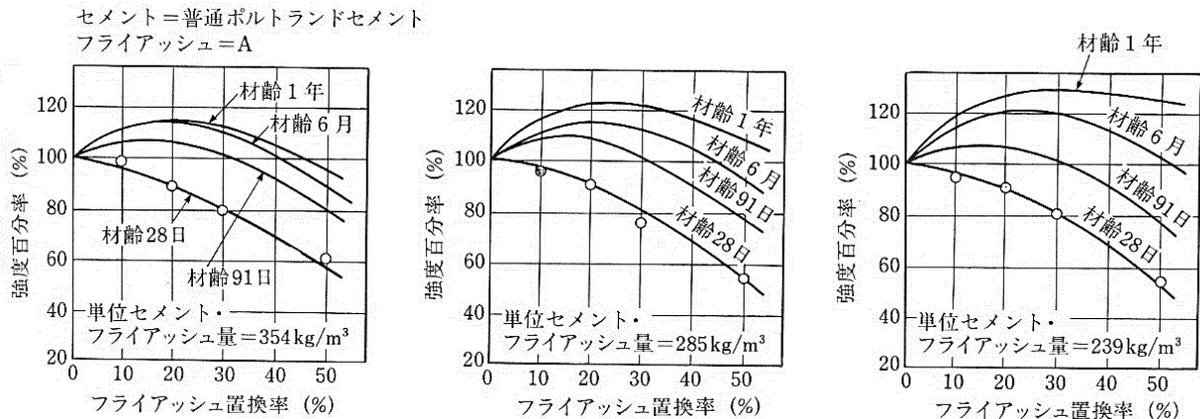


図 2.2.13 フライアッシュ置換率と圧縮強度の関係¹⁰⁾

積雪寒冷地においては、冬期の低温時における強度発現特性の把握が、建設工事においてフライアッシュコンクリートの使用を計画するうえで重要である。強度発現に寄与するセメントの水和反応、フライアッシュのポズラン反応は強い温度依存性を有しており、低温時には反応速度が低下する。図 2.2.14 は、水結合材比 50%，砂結合材比 3 のモルタルの養生温度と圧縮強度の関係を、フライアッシュ置換率 0%，25%で比較した例¹¹⁾である。養生温度 20℃を基準に考えると、フライアッシュを混和したモルタルの圧縮強度は、養生温度 10℃の場合に無混和モルタルの値を大きく下回り、フライアッシュの混和により低温時の強度発現性が低下することが示されている。30℃の場合では、無混和モルタルの長期強度が低下傾向であるのに対し、フライアッシュを混和したモルタルでは強度の増加がみられる。これらのことは、フライアッシュのポズラン反応による強度発現は、セメントの水和反応による強度発現と異なった温度依存性を有することを示唆している。

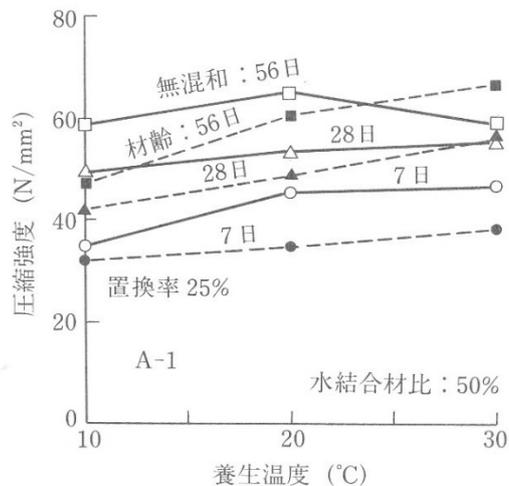


図 2.2.14 養生温度とモルタル圧縮強度の関係¹¹⁾

2) 北海道産フライアッシュを用いた強度発現特性試験

平成 28～29 年度，函館工業高等専門学校・コンクリート研究室において，北海道産フライアッシュを用いたコンクリートの強度発現特性に関するいくつかの実験を行った．ここに，フライアッシュコンクリートの強度発現特性評価の一例として紹介する．

実験で使用したフライアッシュは，北海道電力苫東厚真発電所産のフライアッシュⅡ種である．試験成績表に示されたフライアッシュの品質を表 2.2.4 に示す．

表 2.2.4 フライアッシュの試験成績

項 目	種 類	JIS A 6201 による規定値 ※ 該当の種類を○で囲む				試験値	
		フライアッシュ Ⅰ種	フライアッシュ Ⅱ種	フライアッシュ Ⅲ種	フライアッシュ Ⅳ種		
二酸化けい素含有量 ^{a)}	%	45.0 以上	45.0 以上	45.0 以上	45.0 以上	63.3	
湿 分	%	1.0 以下	1.0 以下	1.0 以下	1.0 以下	0.07	
強 熱 減 量 ^{b)}	%	3.0 以下	5.0 以下	8.0 以下	5.0 以下	1.6	
密 度	g/cm ³	1.95 以上	1.95 以上	1.95 以上	1.95 以上	2.33	
粉 末 度 ^{c)}	網ふるい方法 (45μmふるい残分)	%	10 以下	40 以下	40 以下	70 以下	6
	ブレーン方法 (比表面積)	cm ² /g	5000 以上	2500 以上	2500 以上	1500 以上	4,160
フロー値比	%	105 以上	95 以上	85 以上	75 以上	107	
活性度指数 (%)	材齢28日	90 以上	80 以上	80 以上	60 以上	90	
	材齢91日	100 以上	90 以上	90 以上	70 以上	112	

a. 実験の概要

実験で用いた材料を，表 2.2.5 に示す．これらの材料は，フライアッシュを除けば函館地域のレディーミクストコンクリートの製造に用いられている一般的なものである．ただし，細骨材については砕砂と天然砂をブレンドして用いている場合が多いが，本実験では天然砂のみの使用とした．

表 2.2.5 使用材料一覧

名称	仕様等	密度 (g/cm ³)
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16
フライアッシュ	苫東厚真産フライアッシュⅡ種	2.33
細骨材	瀬棚産天然砂	2.63
粗骨材	峯朗産碎石	2.70
混和剤	マスターポゾリス No.87	1.07
AE 剤	マスターエア 101(1000 倍希釈)	1.00

コンクリートの配合を表 2.2.6 に示す．本実験では，水結合材比を $W/(C+FA)=55\%$ ，細骨材率を $s/a=43\%$ に統一，フライアッシュ置換率を 0%，15%，30% の 3 水準とし，スランプ = $8 \pm 1\text{cm}$ ，空気量 = $6 \pm 1\%$ を目標に配合を試験練りによって決定した．同じスランプ，空気量の条件であることから，フライアッシュ置換率が大きくなるにつれて単位水量は減少し，AE 剤使用量は増加している．

表 2.2.6 コンクリートの配合

名称	W/(C+FA) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	C	FA	S	G	減水剤	AE 剤
FA00	55.0	43.0	171	310	0	759	1033	3.1	0.9
FA15			169	261	46	756	1029	3.1	1.9
FA30			157	200	86	771	1050	2.9	3.9

強度発現特性試験では、標準養生した円柱供試体による材齢 28 日までの超音波速度、動弾性係数、圧縮強度、静弾性係数の測定、超音波連続自動計測システムによる有効材齢 7 日までの超音波速度の変化の測定を行った。

b. 円柱供試体による強度発現特性試験

実験結果の中から、標準養生した円柱供試体を用いた圧縮強度の測定結果を図 2.2.15 に、動弾性係数の測定結果を図 2.2.16 に示す。材齢 28 日までの圧縮強度はフライアッシュの混和によって低下する。建設工事における施工サイクルに関係する初期強度に着目すると、材齢 7 日では、プレーンコンクリートを基準に、フライアッシュ置換率 15%では 69%の圧縮強度、置換率 30%では 50%の圧縮強度となった。フライアッシュコンクリートは長期的には強度の増進が期待できるものの、養生期間が施工サイクルに影響する工事では、このような強度発現特性に配慮しなければならない。フライアッシュの混和による動弾性係数の低下は圧縮強度ほど顕著には表れないが、同様に材齢 7 日で比較すると、置換率 30%で 87%の動弾性係数の値となった。

実際の工事にフライアッシュコンクリートが採用される場合には、強度や耐久性を考慮して水結合材比が定められ一般にプレーンコンクリートより水結合材比が小さくなることから、強度低下はこれほど大きくならないが、養生期間が施工サイクルに影響する工事では事前に初期強度の発現性を実配合で試験・確認するなどの配慮が必要である。

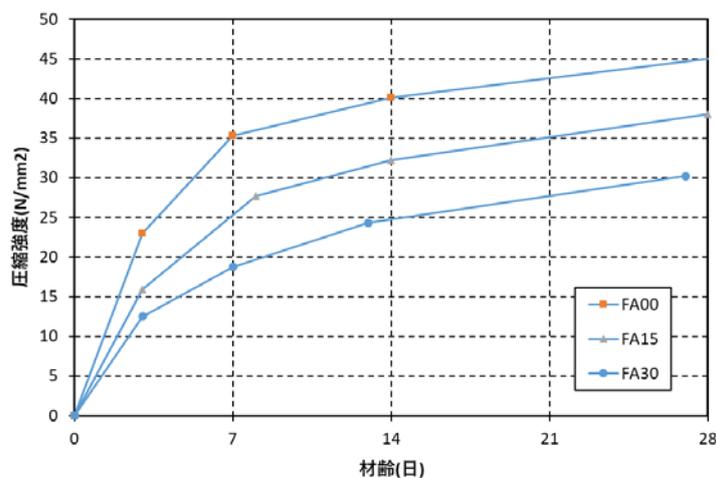


図 2.2.15 圧縮強度の測定結果

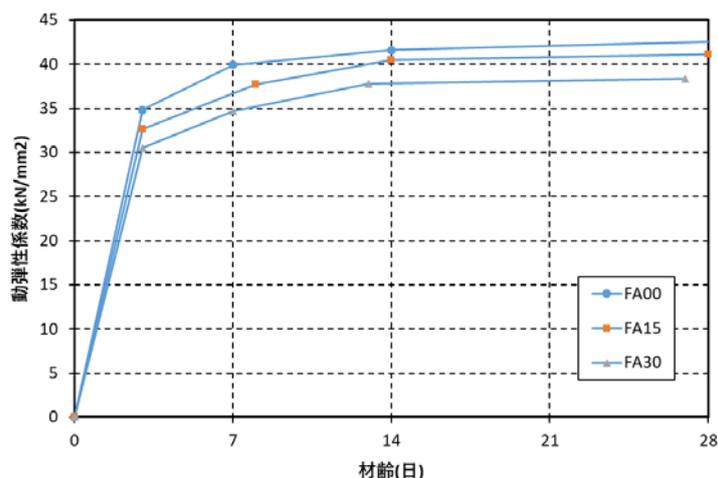


図 2.2.16 動弾性係数の測定結果

c. 超音波による若材齢時強度発現特性試験

円柱供試体による強度発現特性試験と同様の配合で、超音波連続自動計測システムを用いた若材齢時強度発現の測定を、コンクリート温度 10℃、20℃、30℃の3水準で行った。計測システムの構成を写真 2.2.1 に示す。本計測システムでは、あらかじめ超音波プローブをセットした専用の型枠内にコンクリートを打設し、材齢ゼロからの超音波速度の変化を連続・自動的に測定するものである。計測期間は有効材齢 6 日を基準としたので、コンクリート温度 10℃で 10 日、20℃で 6 日、30℃で 4 日を目安とした。

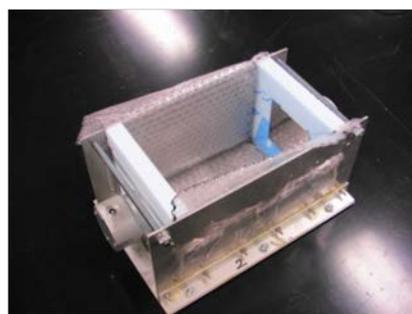


写真 2.2.1 超音波計測システムの構成

超音波速度の計測結果を図 2.2.17～図 2.2.19 に示す。フライアッシュ置換率 0%、15%、30%のそれぞれのケースで、超若材齢時の超音波速度の変化が捉えられており、コンクリート温度が超音波速度の上昇に及ぼす影響が明瞭である。

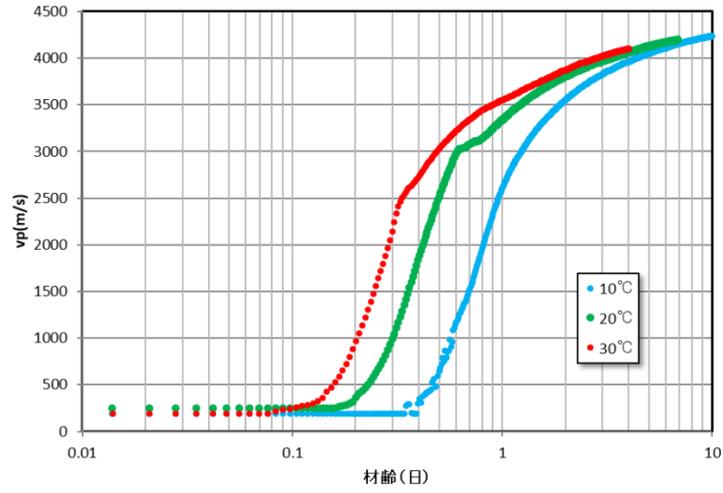


図 2.2.17 超音波速度と材齢の関係(FA00)

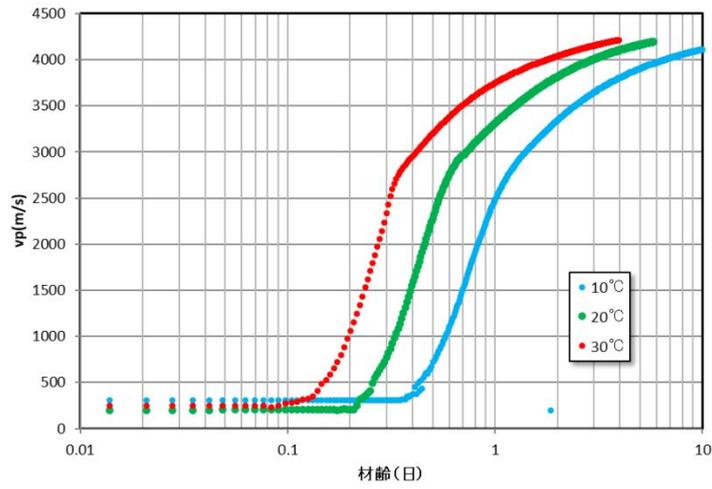


図 2.2.18 超音波速度と材齢の関係(FA15)

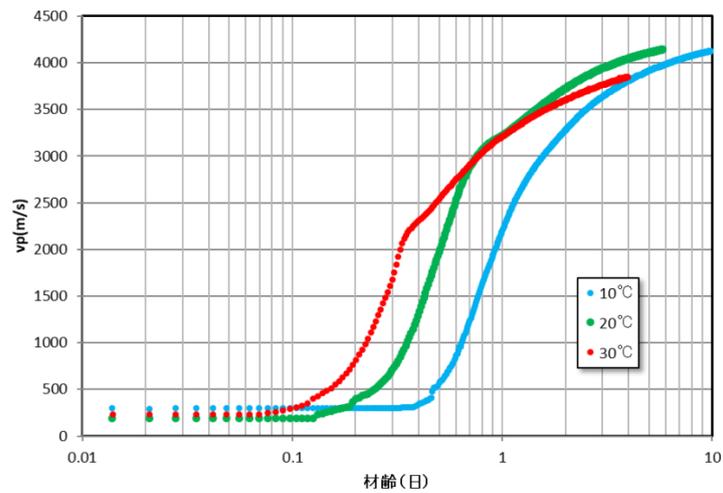


図 2.2.19 超音波速度と材齢の関係(FA30)

温度依存性を評価する比較的簡易な方法として、有効材齢を用いることができる。有効材齢とは、アレニウスの反応速度則を基に、温度の高低による反応速度則の促進・遅延を材齢に考慮したものであり、2002年制定のコンクリート標準示方書[構造性能照査編]から、さまざまな現象の温度依存性を考慮する際に用いられるようになった。また、有効材齢は基準温度を20℃としており、20℃の場合に有効材齢は実材齢と一致する。

式(1)に、コンクリート標準示方書における有効材齢の式を示す。この式は、アレニウスの式において、コンクリート温度20℃のときの反応速度を基準反応速度、活性化エネルギーを4000とした場合と等価である。これより有効材齢は、打設後のコンクリートの温度変化を測定し、式(1)に代入することで求めることができる。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T/T_0} \right] \quad (1)$$

t_e : 有効材齢(日)

Δt_i : 温度が T である時間(日)

T : コンクリートの温度(℃)

T_0 : 1℃

時間軸を有効材齢とした超音波速度の計測結果を図 2.2.20～図 2.2.22 に示す。時間軸を有効材齢とすると、コンクリート温度が異なる超音波速度の変化のデータが、ほぼ一つのライン上に集まることわかる。超若材齢時の超音波速度の変化すなわち強度発現の温度依存性は、有効材齢によって評価することができる。

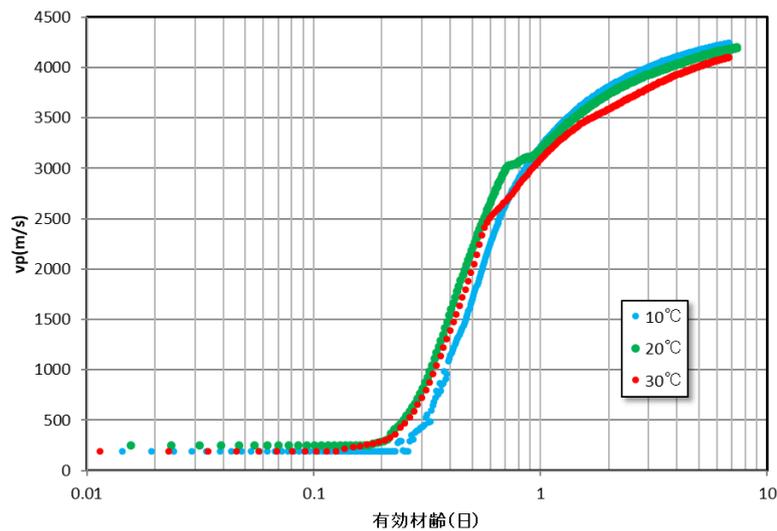


図 2.2.20 超音波速度と有効材齢の関係(FA00)

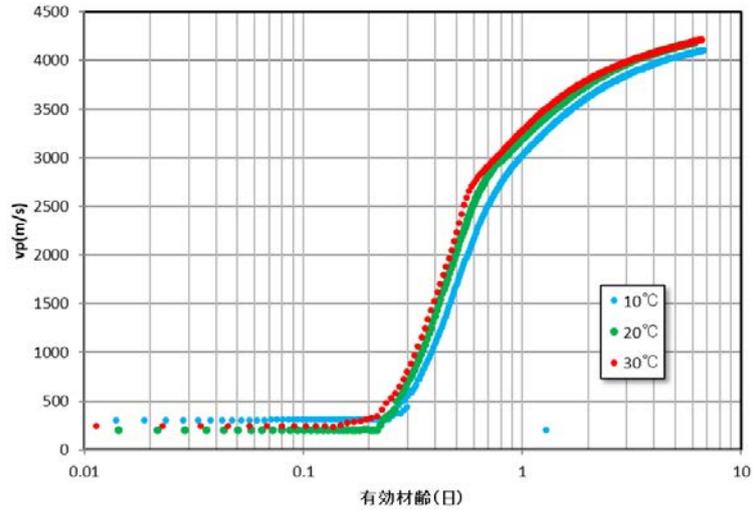


図 2.2.21 超音波速度と有効材齢の関係(FA15)

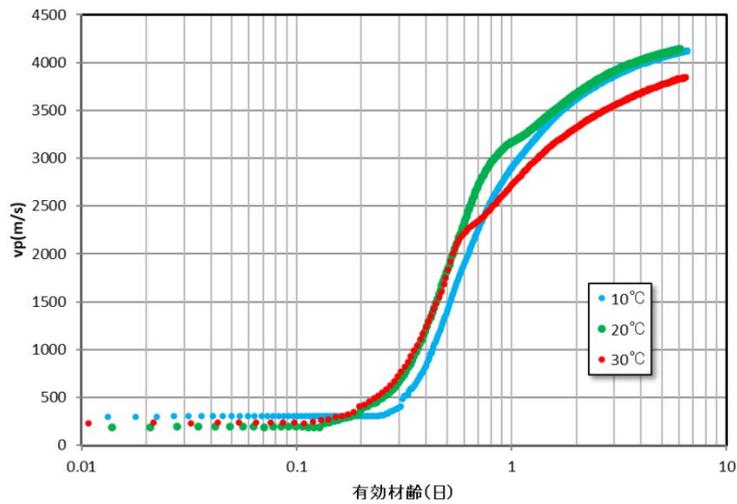


図 2.2.22 超音波速度と有効材齢の関係(FA30)

図 2.2.23 に、フライアッシュ置換率 0%, 15%, 30% について、コンクリート温度 10°C のデータを用いた有効材齢と超音波速度の関係を示す。フライアッシュ置換率 15%, 30% では、置換率 0% のプレーンコンクリートより超音波速度が小さくなっており、若材齢時強度発現に対するフライアッシュ混和の影響を見ることができる。

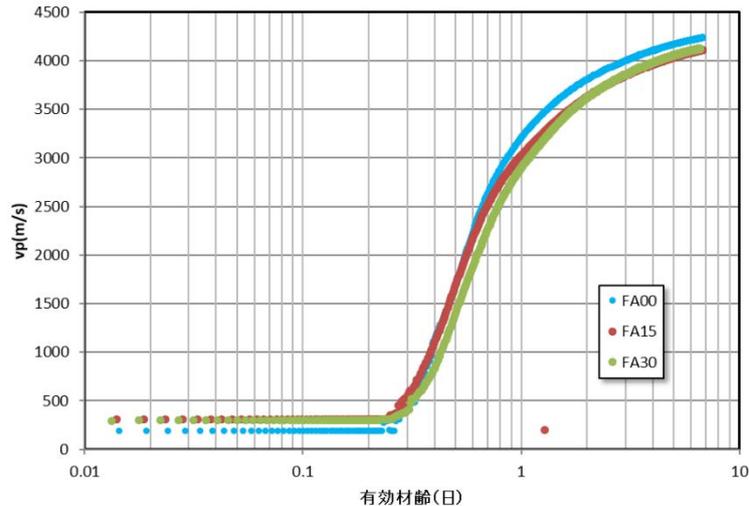


図 2.2.23 超音波速度と有効材齢の関係(10°C)

d. まとめ

今回は、北海道産フライアッシュを用いたコンクリートの強度発現特性を、円柱供試体を用いた実験で把握するとともに、超音波計測によって有効材齢 6 日未満の若材齢時における強度発現特性の把握、特に強度発現の温度依存性の評価を試みた。しかしながら、得られたデータはまだまだ少なく、計測精度も十分とは言えない。今後も実験を継続し、多くの良好なデータを蓄積することが必要である。

フライアッシュコンクリートの採用を計画するうえでの懸念事項となる初期強度発現の遅れ、着目する材齢における強度低下は、わずかな水結合材比の調整で補償することが可能である。フライアッシュの混和によって単位水量を減じることができるため、それは比較的容易であると言える。

このためには、フライアッシュコンクリートの強度発現の温度依存性を、例えばアレニウスの反応速度則等の手法を用いて定量化し¹²⁾、正確な強度発現の遅れ、強度低下の予測結果から水結合材比の調整量を提案できる技術の開発が求められる。初期強度発現特性を定量的に示すことができるようになれば、これらをベースとした強度コントロールのガイドライン等を整備することによって、フライアッシュがより使いやすいものになるであろう。

(3) フライアッシュコンクリートの耐凍害性

硬化コンクリートの耐凍害性は、骨材品質、水セメント比(水結合材比)および空気量により影響されることが知られている。骨材および水セメント比(水結合材比)が同一の場合、コンクリートの耐凍害性は空気量による影響が大きい。一般に、AE 剤などにより所定の空気量が確保され、気泡間隔係数が $250\mu\text{m}$ 程度以下となっていれば、十分な耐凍害性を有することが知られている³⁾。

他方、コンクリートの耐凍害性を評価する方法として、室内試験による凍結融解試験(JIS A 1148)が一般に知られている。本方法は、直方体の供試体(100mm×100mm×400mm)を作製し、所定期間養生(一般に 28 日間)した後、供試体をゴムスリーブに入れ水で満たし、凍結融解試験装置に設置する。試験は、供試体の中心温度が $+5^{\circ}\text{C}\rightarrow-18^{\circ}\text{C}\rightarrow+5^{\circ}\text{C}$ を 1 サイクルとして 1 日に 6~8 サ

イクル繰返し，300 サイクル終了時の動弾性係数の変化率を測定するものである。本方法は，凍結融解作用を促進させて実施しているものであり，コンクリート構造物が実環境に曝される条件とは異なるものである。

ここでは，室内での凍結融解試験(JIS A 1148)およびスケーリング試験(ASTM C 672)の一例と自然環境下に曝露した結果^{13),14),15)}の一例について述べる。

1) 室内試験

使用したコンクリートの配合条件は，北海道開発局仕様の土木用生コンクリートの RC-a に相当するものである。配合条件を表 2.2.7 に，コンクリート配合およびフレッシュ性状を表 2.2.8 に，単位水量の比較を図 2.2.24 に，AE 剤添加率の比較を図 2.2.25 に示す。

表 2.2.7 配合条件^{13),14)}

設計基準強度 f'_{ck} ※1) (N/mm ²)	配合強度 f'_{cr} (N/mm ²)	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	最大水結合材比 (%)	最小単位結合材量 (kg/m ³)
21	27.9	25	8±1.5	5±0.5	55	280

※1) 設計基準強度の材齢は28日

表 2.2.8 コンクリート配合およびフレッシュ性状^{13),14)}

実験ケース	フライアッシュ 置換率 F/(C+F) (%)	水結合材比 W/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									フレッシュ性状			
				水 W	結合材 C+F	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤				スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
										AE減水剤 (g/m ³)	AE減水剤 (%)	AE剤 (g/m ³)	AE剤 (%)			
N280	0	52.5	44	147	280	280	—	846	1,072	700 (0.25)	4.48 (0.0016)	9.0	4.7	20.7		
BB280	0	51.4	44	144	280	280	—	845	1,072	700 (0.25)	5.32 (0.0019)	8.5	4.9	20.0		
FB280	15	49.6	43	139	280	238	42	828	1,094	700 (0.25)	19.04 (0.0068)	9.0	5.0	20.5		
FC280	25	48.6	43	136	280	210	70	827	1,092	700 (0.25)	29.40 (0.0105)	8.5	5.0	20.9		

注) N280, FB280, FC280 のセメント(C)は普通ポルトランドセメント，BB280 のセメント(C)は高セメント B 種
F: JIS II 種，AE 減水剤: リグニンスルホン酸系，AE 剤: ロジン系

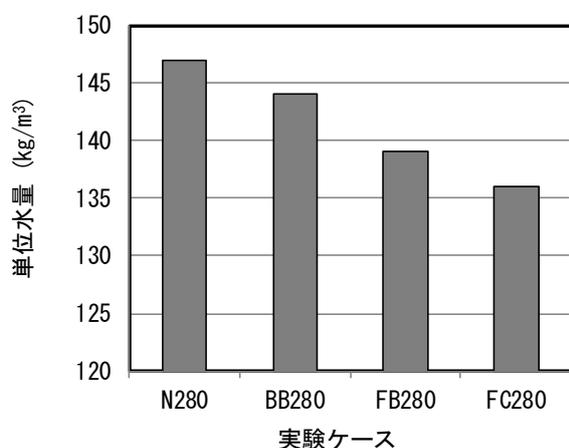


図 2.2.24 単位水量の比較^{13),14)}

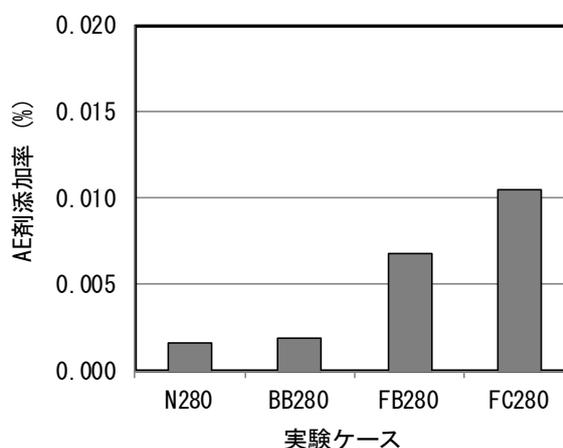


図 2.2.25 AE 剤添加率の比較^{13),14)}

図 2.2.24 より，同一単位結合材量における単位水量はフライアッシュを混和することで減少することが認められる．図 2.2.25 より，空気量 $5 \pm 0.5\%$ が得られる AE 剂量は，フライアッシュを混和した場合，混和しない場合より多くなっていることが認められる(2.2.4 (1) 空気量参照)．

圧縮強度の結果を図 2.2.26 に，凍結融解試験の結果を図 2.2.27 に示す．

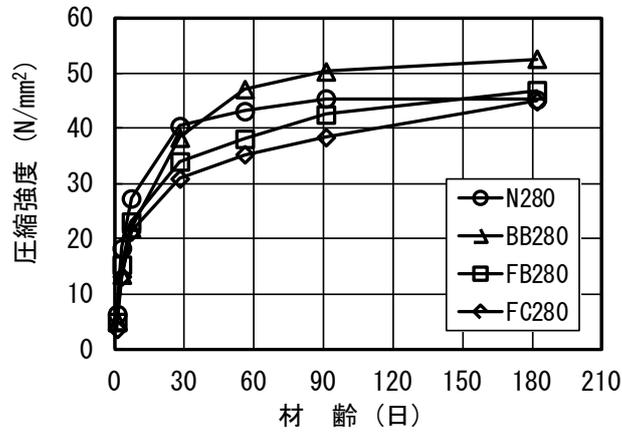


図 2.2.26 材齢と圧縮強度の関係^{13),14)}

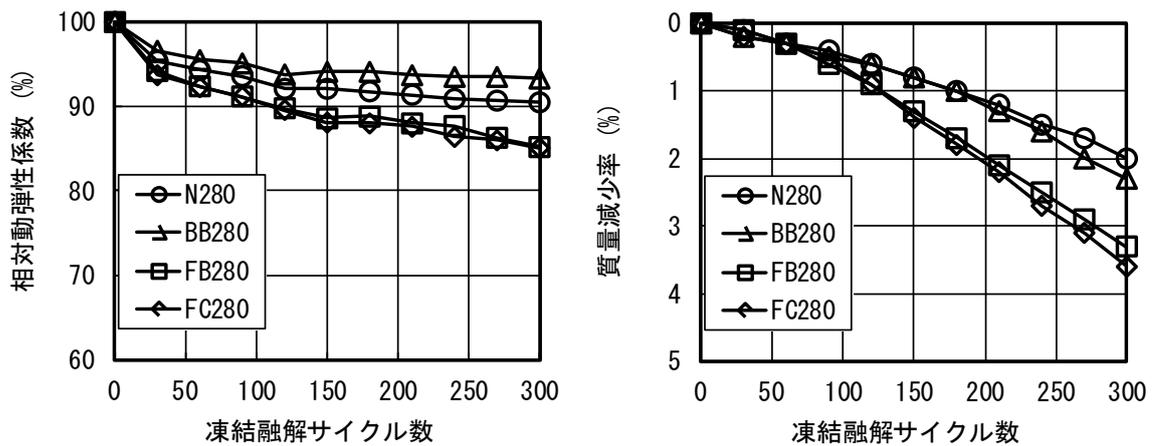


図 2.2.27 凍結融解試験結果^{13),14)}

図 2.2.26 より，同一単位結合材量における材齢 28 日の圧縮強度について，フライアッシュを混和した FB280 および FC280 はフライアッシュを混和しない N280 より圧縮強度は低いが，材齢 182 日になると同程度の強度になることが認められる．

図 2.2.27 より，材齢 28 日から開始した凍結融解試験の 300 サイクル終了時における相対動弾性係数について，フライアッシュを混和した FB280 および FC280 はフライアッシュを混和しない N280 より若干小さいが，85%程度と優れた耐凍害性を有していることが認められる．

スケーリング試験の結果を図 2.2.28 に示す．図 2.2.28 より，スケーリング試験によるスケーリング深さについて，フライアッシュを混和した FB280 および FC280 はフライアッシュを混和しない N280 と同程度であることが認められる．

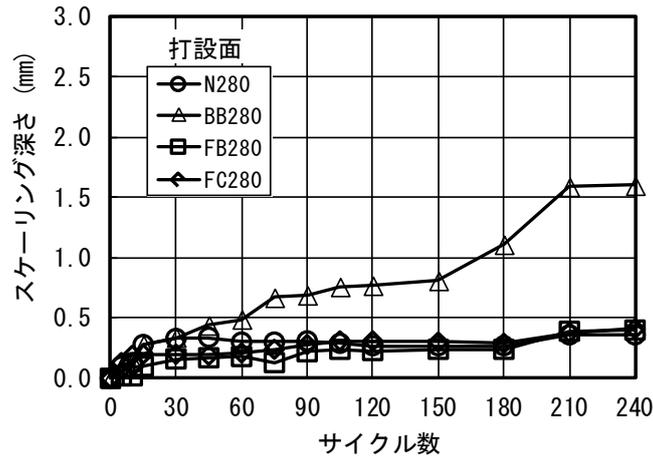


図 2.2.28 スケールリング試験結果¹⁵⁾

2) 曝露試験

室内試験と同一配合により曝露試験用供試体(直径 150mm, 高さ 300mm)を作製し, 材齢 28 日まで標準養生した後, 江別市の曝露試験場のステンレステーブル(高さ 700mm)に設置し, 日照, 降雨, 積雪の影響をうける自然環境下における曝露を 2006 年 6 月から開始した. 一次共鳴振動数測定による相対動弾性係数の経年変化を図 2.2.29 に示す.

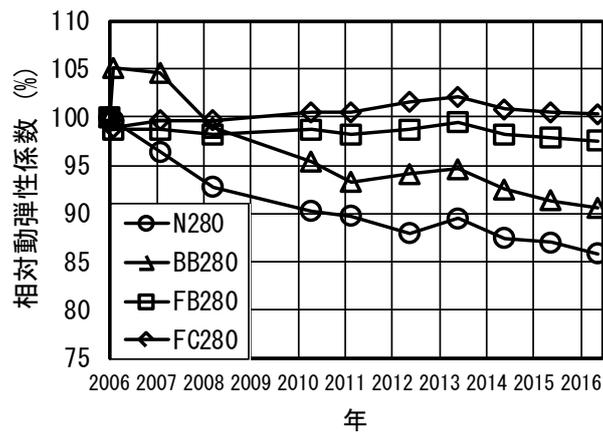


図 2.2.29 相対動弾性係数の経年変化^{13),14)}

図 2.2.29 より, 相対動弾性係数の経年変化は, N280 は時間の経過にしたがい相対動弾性係数は徐々に低下し, 曝露期間 10 年で相対動弾性係数は約 85% まで低下した. BB280 は曝露開始後 2 年間程度は相対動弾性係数は 100% 以上を示し, その後時間の経過にしたがい徐々に低下し, 曝露期間 10 年で約 90% になった. FB280 は曝露直後から 1~2% の相対動弾性係数の低下が認められるが, その後曝露期間 10 年までは大きな変動はなく約 98% の値を示した. FC280 は曝露直後に 1% 程度の相対動弾性係数の低下が認められるが, その後曝露期間 7 年まで徐々に高くなり 102% 程度を示し, その後徐々に低下し曝露期間 10 年では約 100% の値を示した. 曝露期間 10 年では, 室内試験結果と異なり, フライアッシュセメントの耐久性が高いことが認められる.

曝露試験と室内試験の結果が相違する要因として, フライアッシュの自己修復効果が考えられる. 藤原ら^{16),17)}は, 凍結融解により劣化した供試体を用いて修復養生を行うと相対動弾性係数の回復およびひび割れ本数の減少を確認している. これは, 冬季に劣化し夏季に修復すると想定さ

れ、フライアッシュの反応による自己修復効果であるとされている。

他方、漆崎ら¹⁸⁾は凍結最低温度が低くなると耐久性指数は小さくなることを示し、濱ら¹⁹⁾はコンクリート内部の相対湿度が低い場合は凍害を受けにくく相対湿度の影響が大きいことを示している。

室内での凍結融解試験の温度サイクルの一例を図 2.2.30 に、曝露試験における気温と供試体中心温度の一例を図 2.2.31 に示す。

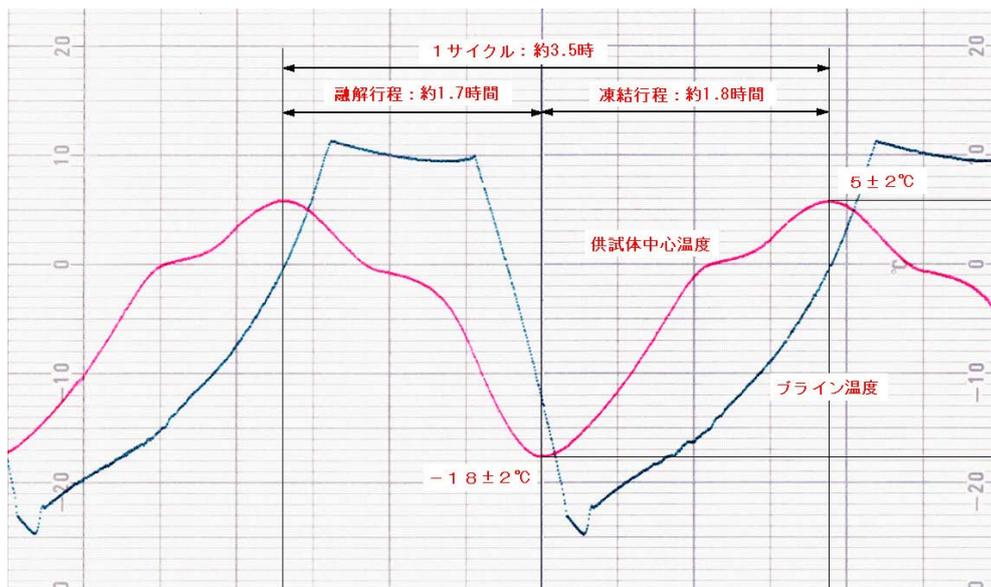


図 2.2.30 凍結融解試験における温度サイクルの一例

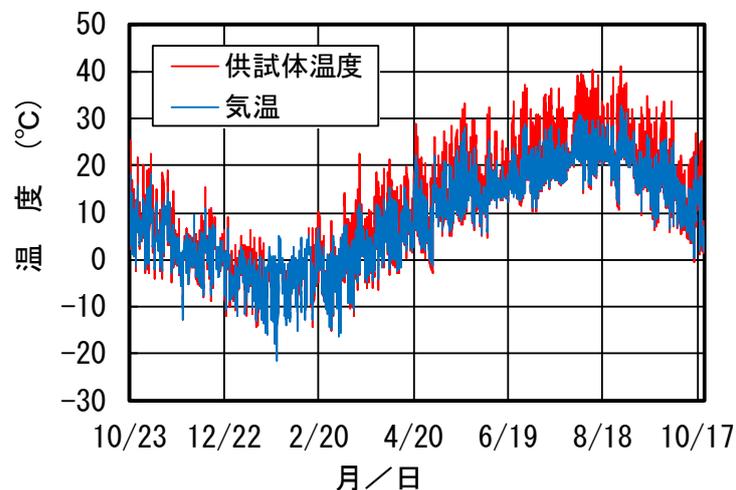


図 2.2.31 曝露試験における気温と供試体中心温度の一例^{13),14)}

図 2.2.30 および図 2.2.31 より、凍結融解試験では供試体中心温度は -18°C まで低下させ、300 サイクル繰り返されるが、曝露試験では1年間に80回程度の凍結融解作用を受けるが、供試体中心温度が -10°C 以下になる回数は20回/年程度であり、 -10°C 以下になる場合は供試体が凍結したまま融解しないことが多い。したがって、フライアッシュコンクリートが自己修復効果と相まって耐久性が高くなったものと考えられる。

2.3 高炉スラグ微粉末

2.3.1 生産と流通

(1) 室蘭製鉄所の高炉スラグ発生量と利用状況

北海道における高炉水砕スラグ(以下、高炉スラグ)の発生量は、新日鐵住金(株)室蘭製鉄所(以下、室蘭製鉄所)からの年間約50~60万tで、全量が有効利用されている。平成16年から平成26年までの高炉スラグの発生量を図2.3.1に示す。

平成26年度の高炉スラグの発生量は54.2万tであり、その利用状況は図2.3.2に示すとおりである。高炉スラグはセメント原料への利用が61%と多く、その内、高炉セメントの混合材としての利用が約3分の2を占める。次いで、盛土、裏込めなどの土工用材料としての利用が25%あり、残りは輸出に向けられる。

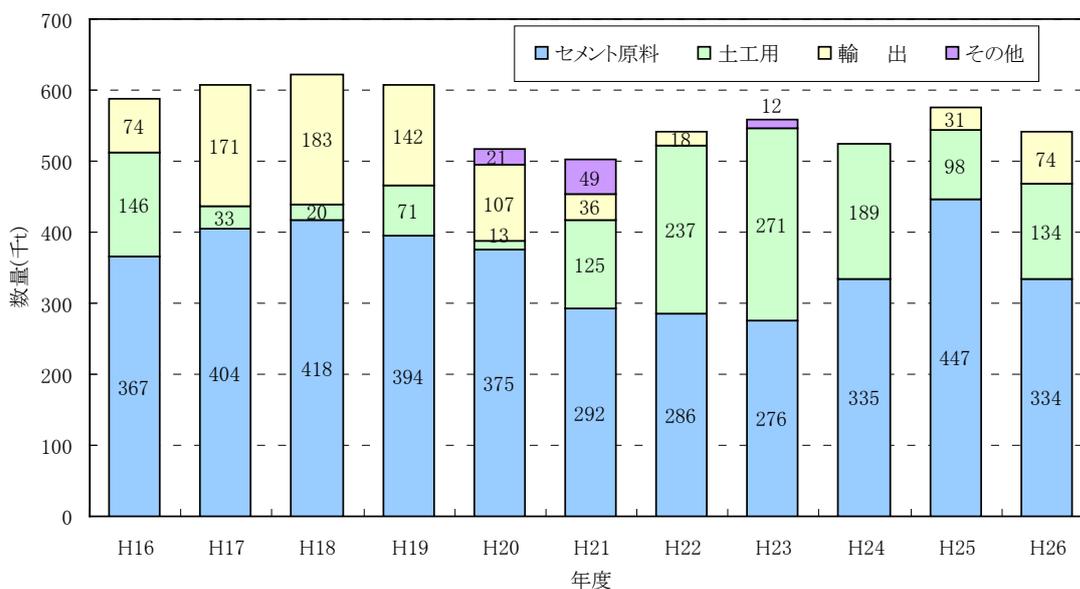


図 2.3.1 室蘭製鉄所の高炉スラグ発生量

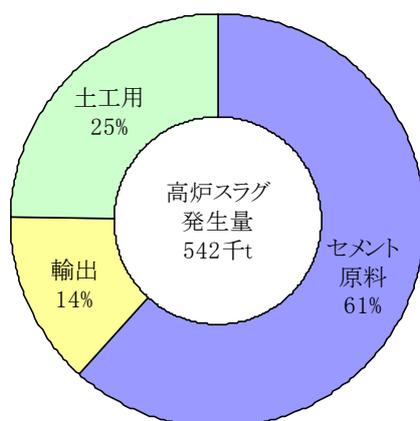


図 2.3.2 室蘭製鉄所の高炉スラグ有効利用状況

(2) 高炉スラグ微粉末の製造

高炉スラグ微粉末の製造フローを図 2.3.3 に示す。高炉スラグを乾燥し、適宜石こうと共にボールミルに投入し、破碎、粒度調整されたものが製品となる。製品は試験により品質を確認後、出荷される。

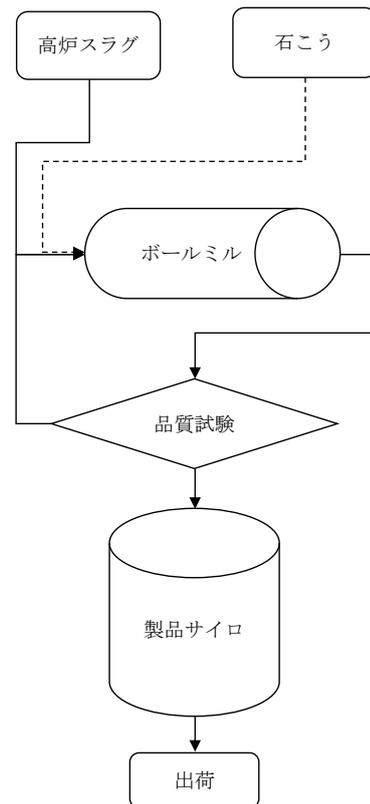


図 2.3.3 高炉スラグ微粉末の製造フロー

(3) 高炉スラグ微粉末の流通

コンクリート用高炉スラグ微粉末の利用形態としては、混和材として利用される場合と高炉セメントとして利用される場合とがある。

高炉スラグ微粉末の生産から納入の物流ルートを図 2.3.4 に示す。製鉄所を起源とする高炉スラグをセメント工場が受け入れ、高炉スラグ微粉末および高炉セメントを製造する。これらの製品は、ジェットパック車(バラ車)にて、生コン工場、プレキャスト製品工場へ運搬される。なお、高炉セメントの中継供給サイロが北海道の主な港に配置されており、中継サイロへは船舶輸送による。

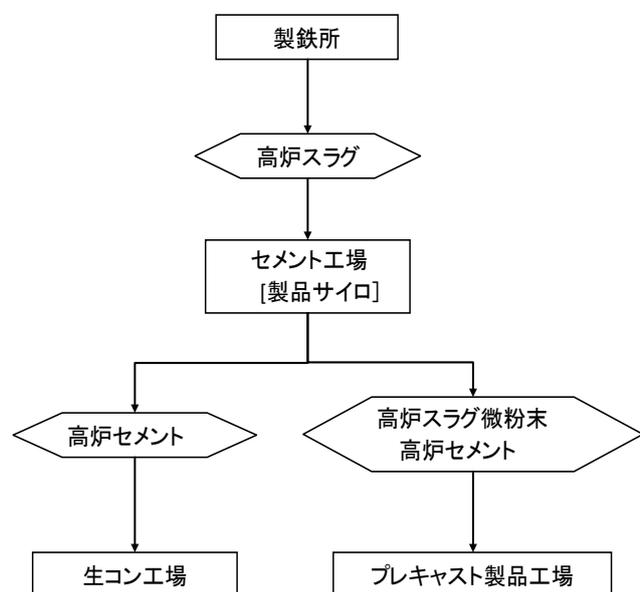


図 2.3.4 高炉スラグ微粉末の物流ルート

2.3.2 品質

高炉スラグ微粉末の品質例を表 2.3.1 に示す。表中の JIS 規格値は JIS A 6206 “コンクリート用高炉スラグ微粉末” に規定されているものである。品質例は日鉄住金セメント製高炉スラグ微粉末の試験値である。JIS A 6206 には比表面積による粉末度で、3000、4000、6000 および 8000 の 4 品種があるが、北海道では日鉄住金セメントがニーズの少ない 3000 を除く、4000、6000、8000 をラインナップしている。

表 2.3.1 日鉄住金セメント製高炉スラグ微粉末の品質例

種 類 品 質		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 8000	
		JIS 規格値	品質例	JIS 規格値	品質例	JIS 規格値	品質例
密 度	(g/cm ³)	2.80 以上	2.91	2.80 以上	2.89	2.80 以上	2.90
比表面積	(cm ² /g)	3500 以上 5000 未満	4020	5000 以上 7000 未満	6020	7000 以上 10000 未満	8020
活性度 指 数 (%)	材齢 7 日	55 以上	71	75 以上	100	95 以上	111
	材齢 28 日	75 以上	95	95 以上	112	105 以上	113
	材齢 91 日	95 以上	114	—	—	—	—
フロー値比	(%)	95 以上	101	90 以上	98	85 以上	99
酸化マグネシウム	(%)	10.0 以下	6.2	10.0 以下	5.4	10.0 以下	5.2
三酸化硫黄	(%)	4.0 以下	0	4.0 以下	3.0	4.0 以下	2.9
強熱減量	(%)	3.0 以下	0.1	3.0 以下	0.5	3.0 以下	0.4
塩化物イオン	(%)	0.02 以下	0.004	0.02 以下	0.003	0.02 以下	0.003

2.3.3 利用状況

(1) 利用形態

北海道で製造されたコンクリート用高炉スラグ微粉末の出荷実績を表 2.3.2 に示す。高炉スラグ微粉末が混和材として利用されるのは 5～8% であり、90% 以上が高炉セメントの混合材として用いられている。混和材として使用されるのは、プレキャスト製品工場が主であるが、表 2.3.2 の建設現場とは民間での試験施工で用いられたケースである。プレキャスト製品工場では、高強度、流動性改善などを目的に、ヒューム管、パイルおよび流し込み製品などに用いられている。一方、高炉セメントとしては生コンへの利用が主体であり、特に土木工事において多くの工種で利用されている。

平成 25～27 年度の比表面積別の出荷量は、4000 がほとんどを占め、6000 で 1%、8000 の実績はない。

表 2.3.2 北海道で製造されたコンクリート用高炉スラグ微粉末の出荷実績

利用形態	用途	H25 年度		H26 年度		H27 年度	
		数量 (t)	比率 (%)	数量 (t)	比率 (%)	数量 (t)	比率 (%)
混和材	プレキャスト製品	1,659	8	1,094	5	1,007	7
	建設現場※ ²	1,450		659		1,337	
高炉セメント※ ¹	生コン	32,713	92	33,872	95	27,325	93
	プレキャスト製品	2,880		2,135		2,046	
計		38,703	100	37,760	100	31,715	100

※1：セメント出荷量より高炉スラグ量を推定

※2：試験施工での利用

(2) 利用事例

北海道における高炉スラグ微粉末の利用事例を示す。

1) 生コン

前述のとおり、生コンでの高炉スラグ微粉末の利用実態は高炉セメントであり、B種が広く一般的に用いられている。大半は土木工事での利用で、早期強度、高強度等の性能を求めない部位に用いられる。しかしながら、北海道の土木工事では地域にもよるが、養生コスト、作業性の面から高炉セメント B 種を用いるコンクリートは 11 月頃から、普通あるいは早強ポルトランドセメントのコンクリートに変更されるのが一般的である。

建築工事では、基礎、地下構造物および現場打ち杭への適用がみられる。上部躯体では、早期強度の要求、中性化抵抗性の観点から、高炉セメントの適用事例は少ない。なお、日本建築学会は「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)を発刊し、要求性能に環境配慮性を加えて、建築工事での CO₂ 削減に向けて取り組んでいる。

2) プレキャスト製品用コンクリート

プレキャスト製品分野では、流動性改善、高強度および高耐久性を目的に用いられている。流動性改善では、高炉スラグ微粉末の混合率が 10～20%ほどで、パイル、ヒューム管の遠心成型コンクリート、インターロッキングブロックなどの即脱成型用で用いられている。

耐化学抵抗性では、酪農飼料のバンカーサイロ用パネルに用いられている。飼料の発酵過程で生成する乳酸などの有機酸にコンクリートが浸食されるため、耐酸性向上を目的に高炉スラグ微粉末を 70%混合したものである。

3) ダムコンクリート

ダムコンクリートに高炉スラグ微粉末を用いる目的は水和発熱の抑制である。

北海道で最初に高炉セメントを大量に使用したのは桂沢ダムであり、その後金山ダム、大夕張ダムなど多くのダムで使用された。利用形態はセメントであり、普通ポルトランドセメントある

いは中庸熱ポルトランドセメントをベースに粉末度が 3000~4000cm²/g の高炉スラグ微粉末を 50~65% 混合していた。近年のダム工事では、札内川ダムで中庸熱高炉セメントが使用されたのを最後に、中庸熱フライアッシュセメントが用いられている。

主な利用事例を表 2.3.3 に整理した。

表 2.3.3 高炉スラグ微粉末の利用方法事例

種類	利用目的	活かされた特長	内容 ()内の数字は主な比表面積を示す
生 コン クリ ート	高流動コンクリート用粉体	材料分離抵抗性	(6000)粉体系高流動コンクリートの粉体として適量使用し、材料分離抵抗性、流動性を向上する。
	長期耐久性を要求されるマスコンクリートの温度ひび割れ対策および高強度、高耐久	水和熱抑制 高強度 耐久性	(8000)多量置換により水和熱を抑えることで温度ひび割れ発生を抑制し、粉末度の大きい種類を用いることで高強度および高耐久性を付与する。 【長期耐久性試験施設に適用】
	海岸に近い橋の上部地覆コンクリートの耐塩害性向上	塩害対策	(6000)適量使用し塩化物イオン浸透を抑えることで、海水および凍結防止剤による塩害を抑制する。
プ レ キ ャ ス ト 製 品	コンクリートの流動性、充てん性の改善	流動性、充てん性の向上	(4000)適量使用することで、遠心成型用コンクリートの流動性、即脱成型用コンクリートの充てん性を向上する。
	道路用プレキャスト製品の高耐久化	塩害対策 凍害対策	(6000)適量使用し塩化物イオン浸透を抑えることで、凍結防止剤による塩害を抑制し、かつ凍結融解による複合劣化を抑制する。
	酪農関連製品用コンクリートの耐化学抵抗性向上	耐化学抵抗性	(4000)適量使用することで耐化学抵抗性を向上させ、酪農飼料バンカーサイロなどの有機酸による劣化を抑制する。
ダ ム コ ン ク リ ート	ダムコンクリートの温度ひび割れ対策	水和熱抑制	(4000)普通あるいは中庸熱ポルトランドセメントをベースに 50~65% 置換し、水和熱を抑えることで、温度ひび割れ発生を抑制する。

2.3.4 寒冷地のコンクリート性状に与える影響

(1) 強度発現

高炉スラグ微粉末を混和材として使用したコンクリートの利点としては、一般にフレッシュ性状の改善、長期強度の増進、発熱速度・温度の抑制、化学抵抗性の向上、アルカリ骨材反応の抑制効果などが挙げられる。その反面、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、スラグ無混和のコンクリートと比較した場合、材齢3日、7日といった材齢初期において強度発現に劣る(図 2.3.5 参照)。この傾向はスラグ置換率が大きいほど、高炉スラグ微粉末の比表面積が小さいほど顕著に現われる(図 2.3.6 参照)。加えて低温環境下では、特に材齢初期の強度発現が遅れることが指摘されている²¹⁾。したがって、寒冷地における施工では、高炉スラグ微粉末の置換率や比表面積を慎重に選定した上で、養生方法を十分に検討し、確実に実施することが重要である²²⁾。

一方で高炉スラグ微粉末の比表面積を大きくすれば、反応性が改善され初期強度発現がかなり改善される(図 2.3.6 参照)。しかし、比表面積が大きいと水和熱や自己収縮の増大に伴うひび割れ発生が懸念されることから、使用に際しては十分な事前検討が必要である。

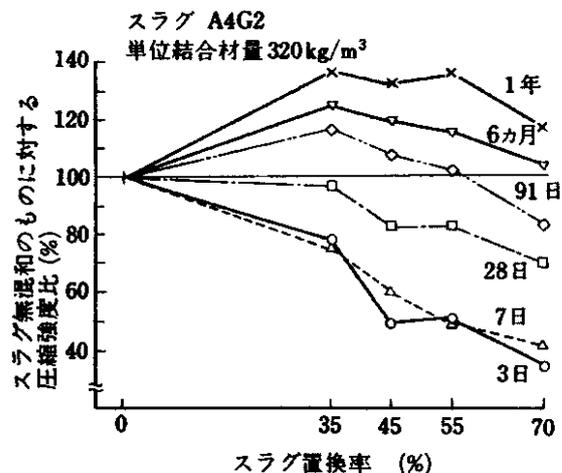


図 2.3.5 スラグ置換率と無混和コンクリートに対する圧縮強度比の関係²⁰⁾

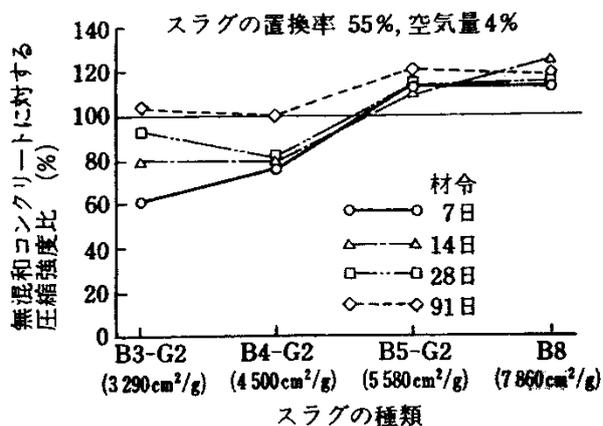


図 2.3.6 スラグの比表面積と無混和コンクリートに対する圧縮強度比の関係²⁰⁾

係²⁾

(2) 耐凍害性

表 2.3.4 に高炉スラグ微粉末の置換率や比表面積を変化させたコンクリートの凍結融解試験に

表 2.3.4 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの耐久性指数

スラグ置換率 (%)	高炉スラグ微粉末の比表面積(cm ² /g)	水結合材比(%)			
		45%		55%	
		空気量(%)	耐久性指数	空気量(%)	耐久性指数
0	—	4.3	98	5.0	87
30	4000	4.0	99	5.5	91
	6000	4.2	98	4.0	99
	8000	4.5	99	4.2	90
50	4000	3.6	99	3.8	92
	6000	3.8	99	4.3	98
	8000	3.8	99	4.2	89
70	4000	3.5	98	3.9	97
	6000	3.7	99	3.2	99
	8000	3.9	99	3.9	90

※文献 23)を参考に作成

よる 300 サイクル終了時の耐久性指数を示す。コンクリートは、AE 減水剤を使用して空気量を管理した試験体であり、スラグの置換率に関わらず高い耐久性指数を示している。良質な空気量を適量連行すれば、スラグ無混和のコンクリートと同等以上の高い耐凍害性を保持できると考えられる。

一方、凍結融解の繰返し作用を受ける海洋コンクリート構造物の主な劣化現象であるスケーリング性状を明らかにすることを目的として、昭和 63 年秋季より北海道オホーツク海沿岸にて消波ブロックを用いた曝露実験が行われている^{24),25)}。消波ブロックは、打込み後に麻袋を掛け散水養生を 7 日間行い、その後写真 2.3.1 に示すような常時潮風を受け、波しぶきをまれに受ける海上大気中に曝露されている。図 2.3.7 に曝露したコンクリートの経過年数に伴うスケーリング面積率を示す。スケーリング面積率とは、図 2.3.8 に示すように曝露コンクリートの上面と下面に透明のフレームシートを当て、スケーリング部分を油性ペンでなぞり、画像処理によりフレームシート部分の面積に対するスケーリング部分の面積の割合を求めたものである。普通ポルトランドセメント(N)のみ使用した場合にはスケーリングが発生しにくく、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末(BS)を混合した場合や高炉セメント B 種(BB)を使用した場合でスケーリング面積率が大きくなることを確認されている。曝露開始材齢の 7 日強度は、普通ポルトランドセメントの場合が 25.0N/mm^2 に対して、高炉スラグ微粉末を用いた場合が 13.9N/mm^2 、高炉セメント B 種を用いた場合が 16.3N/mm^2 であった。曝露開始が秋季であり、高炉スラグ微粉末および高炉セメント B 種を用いた場合では強度が十分に発現しないうちに凍結融解作用を受けたことがスケーリング面積率の増加につながったものと考えられる。高炉スラグ微粉末および高炉セメント B 種を用いる場合、養生後直ちに凍結融解作用を受けるような環境下では、養生期間を長く確保し、十分に強度発現を促してから実環境に供することが望ましいと考えられる。



写真 2.3.1 網走港暴露コンクリート

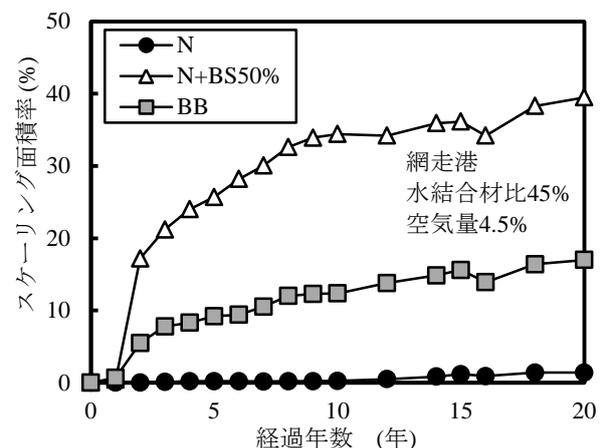


図 2.3.7 スケーリング面積率の経時変化²⁵⁾

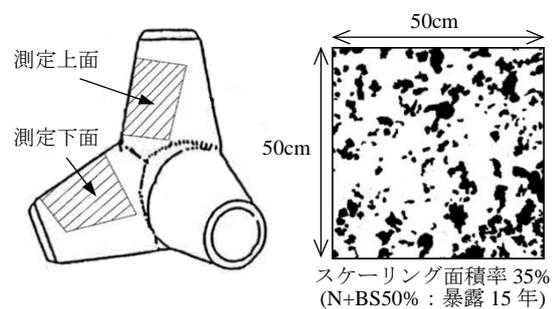


図 2.3.8 スケーリング面積測定方法²⁵⁾

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会北海道支部：北海道におけるコンクリートの歴史, pp.137-140, 2003
- 2) 杉山隆文, 井上真澄, 小野寺収, 澤村秀治：積雪寒冷地におけるコンクリート用混和材としての高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの利用, コンクリート工学, Vol.54, No.9, pp.907-913, 2016
- 3) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点'17, pp.63, 2017.9
- 4) 土木学会：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, コンクリートライブラリー132, pp.22-23, 2009.12
- 5) 北海道電力(株)火力部：MB 吸着量変動によるコンクリート品質調査, 社内報告書, 2016
- 6) 北海道電力(株)総合研究所：フライアッシュの未燃分によるコンクリートの影響試験業務, 社内報告書, 2006
- 7) 北海道電力(株)：実機試験によるコンクリート性状についての社内資料, 2007
- 8) 北海道ティーシー生コン(株), 日本シーカ(株)：実機試験によるコンクリート性状についての社内資料, 2017
- 9) 平野利光, 畑本浩樹：石炭灰の利用(その 2), 電力土木, No.254, pp.69-75, 1994
- 10) 吉越盛次：混和材としてのフライアッシュに関する研究, 土木学会論文集, 第 31 号, pp.1-62, 1955
- 11) 大賀宏行, 国府勝郎, 坂井悦郎, 大門正機：フライアッシュの潜在的性質とモルタルの諸物性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.339-344, 1996
- 12) 澤村秀治, 大清水知穂, 熊城圭佑：超音波によるフライアッシュコンクリートの若材齢時強度発現の温度依存性の評価, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集 (DVD-ROM), V-388, 2017.9
- 13) 齋藤敏樹, 関谷美智, 開洋介：フライアッシュコンクリートの室内試験および曝露試験による耐久性について, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.181-186, 2017
- 14) 開洋介, 関谷美智, 齋藤敏樹：10 年曝露したフライアッシュコンクリートの耐久性について, 土木学会第 72 回年次学術講演会論文集, V-369, pp.737-738, 2017
- 15) 齋藤敏樹, 山上光憲, 高橋昌之：フライアッシュコンクリートの耐久性について, 土木学会第 65 回年次学術講演会論文集, V-302, pp.603-604, 2010
- 16) 藤原佑美, 濱幸雄, 山城洋一, 齋藤敏樹：フライアッシュを用いたモルタルの自己修復効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, pp.303-308, 2007.7
- 17) 藤原佑美, 濱幸雄, 山城洋一, 齋藤敏樹：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, pp.873-877, 2008.7
- 18) 漆崎要, 桂修, 鎌田英治：コンクリートの凍害に及ぼす凍結最低温度の影響に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.919-924, 1998
- 19) 浜幸雄, 胡桃澤清文, 谷口円, 桂修：寒冷環境下に曝露したコンクリート内部の温湿度変化と等価積算温度, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.819-824, 2007
- 20) 田沢雄二郎, 石井明俊, 伊藤隆彦：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの諸物性, 高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.95-98, 1987
- 21) 北辻政文, 藤居宏一：寒冷地コンクリートへの高炉スラグ微粉末の利用に関する研究, 農業土木学会論文集, No.184, pp.73-79, 1996.8

- 22) 土木学会コンクリート委員会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，土木学会，1996
- 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の技術の現状，1992.6
- 24) 加藤利菜，鮎田耕一，猪狩平三郎，佐藤大吾：寒冷地における海洋コンクリートの表面剥離に及ぼす気象条件と使用材料の影響，コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.751-756, 2005
- 25) 加藤利菜：寒冷地の海洋環境下におけるコンクリートのスケーリングに関する研究，北見工業大学博士論文，2006.3

3章 アンケート調査

3.1 アンケートの目的

これまで産業副産物起源のコンクリート用混和材は、コンクリートの環境負荷を低減させることを主目的に着目・利用されており、その主要材料には JIS 化された高炉スラグ微粉末やフライアッシュがある。これらの混和材の技術的状況を考えた場合、環境負荷低減だけでなく、コンクリートの耐久性確保、ひび割れ防止、施工性向上など、コンクリートの品質を改善し、より要求性能に合致したコンクリートならびにコンクリート製品の提供が可能になる。一方で北海道でもこれらのコンクリート用混和材を利用した実例があるが、積雪寒冷地のみならず、全国的な社会的状況においても積極的な利活用に繋がっていない。これには何らかの問題があると判断し、本委員会では積雪寒冷地特有の技術面および社会面の両者を含めた課題の洗い出しと、状況改善が必要であると考えた。

しかし、改善するにあたり様々な場面での課題が挙げられる。そこで、産業副産物起源のコンクリート用混和材の利用状況について課題を洗い出すことを目的に本委員会内で第1回アンケート調査を実施した。さらに、第2回アンケート調査は、コンクリート用混和材を積雪寒冷地の各場面で利用した実例(実態調査)の詳細について第1回アンケートと同様に本委員会内で実施した。ここでは、設計・発注・施工・維持管理等の各段階で洗い出された課題・その解決策・実態等の詳細な知見を得ることを目的となる。なお、アンケート結果の公開については、全委員の承諾を得てここに整理するものである。アンケートの内容は、巻末資料集(資料10)を参照されたい。

3.2 アンケート集計結果

3.2.1 第1回アンケート集計結果

第1回のアンケートは、総合建設業：6社、建設コンサルタント：4社、コンクリート製品メーカー：4社、生コン供給メーカー：2社、セメント会社：2社、電力会社：1社、土木資材代理店：1社、サービス業：1社、研究機関：1機関の計21社1機関からの回答を頂いた。

(1) 一般項目

【Q1】「これまでに産業副産物起源の混和材を使用したことがありますか？」

この設問に対して、7割程度が使用したことがあると回答を得た。

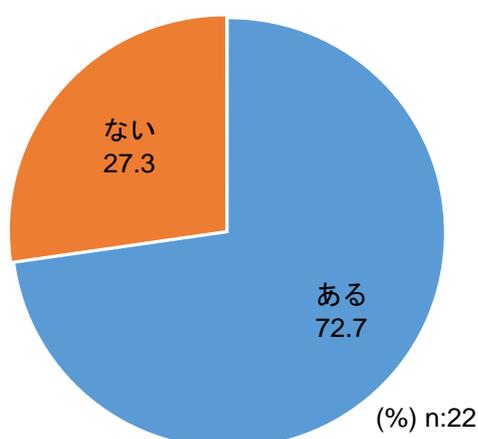


図 3.2.1 Q1 回答結果

【Q2】 Q1で「ある」と回答した方にお聞きします「それは JIS 化された混和材ですか？それは何ですか？」

この設問に対しては、フライアッシュや高炉スラグ微粉末の使用や検討の回答があり、JIS 品や非 JIS 品の扱い経験が寄せられた。

表 3.2.1 Q2 の回答結果

産業副産物名	品質	備考
フライアッシュ	JIS	I 種, II 種
	非 JIS	原灰
高炉スラグ微粉末	JIS	4000, 6000, 8000 ブレーン
	非 JIS	8000 ブレーン
その他	JIS	高炉セメント B 種, フライアッシュセメント, 石灰石微粉末*, シリカフェーム, 高炉スラグ細骨材
	非 JIS	無し

注)* : JCI 規準参照

【Q3】 Q2 を記載した方にお聞きします「どのような場面で使用しましたか？」(差支えない範囲で構いません。できれば寒冷地での使用の有無、基準やガイドライン、設計強度の記載をお願いします。)

この設問に対しては、橋梁構造物、ダム構造物、道路構造物、港湾構造物、その他建築系での利用報告があり、その多くが寒冷地の使用であった。また、引用された基準やガイドラインに関しては、学会関係の指針、発注者の仕様との回答が寄せられた。

表 3.2.2 Q3 の回答結果

使用場面	使用混和材	寒冷地の有無	基準やガイドライン	設計強度
工場製品(高流動・高強度)	高炉スラグ微粉末	有	JIS, 土木・建築学会高炉スラグ微粉末コンクリート指針	18~36
工場製品(振動・高流動・超硬練り)	高炉スラグ微粉末, フライアッシュ	有	—	~30
工場製品(高流動)	フライアッシュ II or 高炉スラグ微粉末	有	形状は JIS, 配合は特記・承認願	18, 24
工場製品(耐酸性・塩害・凍害)	高炉スラグ微粉末, 高炉スラグ細骨材	有	耐酸性は東京都下水道局	50
工場製品(構造物)	高炉スラグ微粉末	—	—	50
混合セメント(B, C 種)用混合材	高炉スラグ微粉末, フライアッシュ	有	JIS	18~36, 50~
中庸熱フライアッシュセメント(ダム)用混和材	フライアッシュ	有	JIS, 特記仕様書	—
コンクリートダム	フライアッシュ	—	特記仕様書に記載	—
公共工事(冬季施工は N)	高炉セメント(標準) or フライアッシュセメント	有	共通仕様書=グリーン購入法	—
高流動・地下基礎ひび割れ抑制	フライアッシュ II or フライアッシュ B 種セメント	有	特記仕様書, コンクリート標準示方書, コンクリートライブラリー	—
建築物の基礎(マスコン), 地下躯体	フライアッシュ	—	—	—
トンネル吹付け	フライアッシュ	有	特になし	—
トンネル吹付け	フライアッシュ	—	—	18
橋梁での車道地覆・橋台工	高炉スラグ微粉末	有	公共工事: 発注者仕様	24
電力施設工事(生コン)	フライアッシュ	有	JIS, 土木学会, 建築学会	18, 24, 27
電力施設工事現場	フライアッシュ	有	特記として使用が前提	—
水中不分離モルタル, 可塑状グラウト	フライアッシュ	有	特になし	—
気泡混合軽量盛土, セメント改良土	フライアッシュセメント	—	特になし	—
高流動, 高強度等各種試験, 研究	フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末, LS*1, SF*2	—	JIS, 土木学会, 建築学会, JCI	—
凍害と塩害を受けるコンクリート(試験)	フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末, SF*2	有	開発局特記仕様書	—

<備考>*1: 石灰石微粉末, *2: シリカフェーム

【Q4】Q2, Q3 を記載した方にお聞きします「それはどのような目的・提案で使用しましたか？」
(複数回答可)

この設問に対しては、その他の分類が多く、それを除くと、仕上がり品質面、施工性、コスト面が多く回答された。その他の内訳では、環境改善・負荷低減、コンクリートの品質(フレッシュ時、硬化後)・耐久性改善が多く挙げられている。

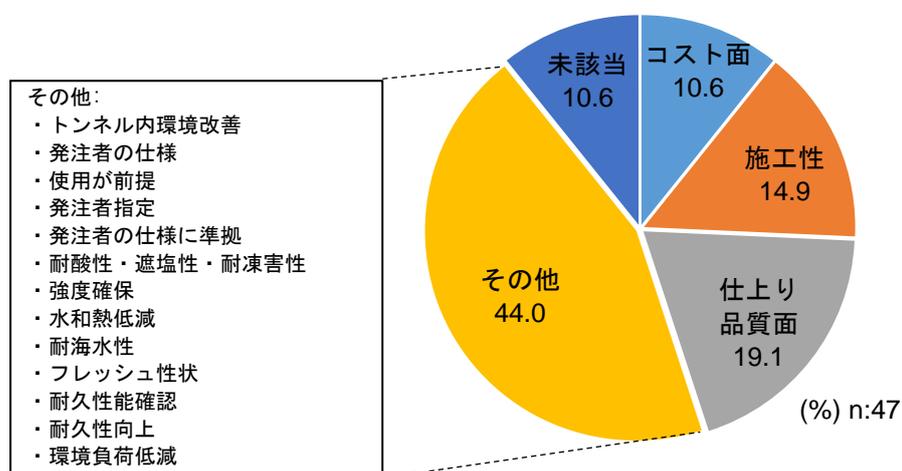


図 3.2.2 Q4 回答結果

【Q5】「当事者ではないが産業副産物起源のコンクリート用混和材を寒冷地で使用した物件・事例をご存じですか？」

この設問に対して、下記の回答が得られた。

- ・ 温度ひび割れ対策で、低発熱型特殊高炉セメントの仕様(橋梁基礎)。
 - ・ 粉体量が必要な配合に対し、温度ひび割れ対策を含め、石灰石微粉末ではなくフライアッシュを使用。
 - ・ 塩害環境下での橋梁下部工耐震補強：RC 巻き立て工法、普通ポルトランドセメントの塩害照査で不合格になり、高炉セメントで計画(採用の可否不明)。
 - ・ 消波根固めブロック：高炉スラグ細骨材と高炉スラグ微粉末の併用。
 - ・ 消波根固めブロック：セメントを使用しない炭酸ガス固化体(高炉スラグ微粉末、高炉スラグ骨材)。
 - ・ 東北で高炉スラグ微粉末 6000 を用いた現場打ち、またはプレキャスト製品(いずれも PC とと思われる)が使用されている模様。
 - ・ 小樽方面の国道トンネルの一次覆工吹付けコンクリートに高品質化(主目的は耐硫酸性)としてシリカフュームが使われている。
 - ・ 北陸でフライアッシュを用いたプレキャスト製品が使用されている。
- (注:Q3 と重複する内容は省略)

【Q6】「産業副産物起源のコンクリート用混和材を普及させたいが、上手くいかない。」と言われてますが、どう思われますか？

この設問に対して、下記の回答が得られた。約7割で普及が上手くいかないと感じている。

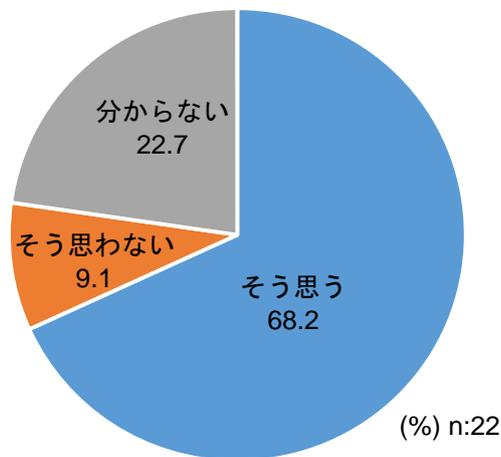


図 3.2.3 Q6 回答結果

【Q7】 Q6で「そう思う」とお答えした方にお聞きします「それは何故だと思いますか？」

この設問に対しては、具体的に記載して頂いた。その回答を整理すると「流通システム・基準」、「社会事情」、「コスト」、「環境」、「製造設備」、「配合・混和材の特徴」に分類することができる。

【流通システム・基準】

- ・ 公共事業を行う会社なので発注者が採用すれば普及すると思う。そのためには、製造元の採算性や持続可能な供給システムの構築、設備の普及等の問題を解決する必要がある。
- ・ 環境負荷低減の目的からも、公共工事で率先して利用する仕組みが必要である。混和材に関するユーザーの理解が低く、官民一体となった普及活動が必要である。
- ・ 混和材の使用は設計仕様となっていないことが多く、仕様変更に伴う監理者、発注者への手続きが煩わしい。
- ・ 仕様書が整備されていない。
- ・ 通常の設定でも製造できるような基準等(計量方法・適用範囲)があれば普及されるように思う。
- ・ 発注仕様に明記されていないため使用しづらい。
- ・ 官公庁の発注の問題。
- ・ 性能規定型の設計体系が定着し耐久性が重視される環境の整備が必要である。また、発注者、施工者、ともに混和材を使用した場合の耐久性向上効果を把握する必要がある。大学や研究機関は具体的にそれらを示すとともに将来的な耐久性の予測手法も提示し、使用できる環境を整備していくことが肝要と思う。

【社会事情】

- ・ 産業副産物自体が多種多様にあり、どこまでをコンクリート用混和材とするのかが大きな問題に思える。また、産業副産物がある時は資材、ある時はゴミとして意識している方も多いのも問題と思う。セメント自体も既に大量の産業副産物を受け入れて製造しており、それにさらに産業副産物を混和すると、社会的イメージでコンクリートはゴミ？と認識されてはいないだろうか。それを払拭させるためにも、諸物性・耐久性を明確にし、上手く社会に宣伝を行わないと、普及しないと思われる。工場は基本的に JIS 認定を取得しているため、JIS 以外の材料は使いづらい。
- ・ 普通ポルトランドセメントが普及しており、混和材を利用する目的がユーザー側に理解されていない。
- ・ フライアッシュセメントや高炉セメントとしては広く普及しているが、産業副産物がコンクリート用混和材として利用できること自体が、世の中に広まっていない可能性もある。認知度が低いと思う。
- ・ 正しい知識が周知されていない。
- ・ 産業副産物を用いたコンクリートの特徴をもっと広める努力と、使用する側のメリットがないことが普及を妨げている主な要因であると考え。産業副産物混和材の代表であるフライアッシュや高炉スラグ微粉末の使用の仕方でも耐久性が向上することを理論的に説明できるデータ作りが不足している。
- ・ 混和材については、発注者側からの指定があって使用しているが、生コン側から提案するようなケースはない。ゼネコンから相談があって対応することはある。
- ・ 産業副産物の利用ということで、利用者側にはコスト削減が条件であるとの認識、利用により耐久性低下が懸念されるとの認識がある。コスト削減に繋がる地域もあれば、設備投資や手続きおよび管理の煩雑さからコスト増となっている地域もあり統一性がないことから利用しづらい感覚が広がっていると思われる。

【コスト】

- ・ コスト面での優位性があるのであれば、当然使用する機会は増えると思う。
- ・ コストメリットなど、直接的かつ明確なメリットアピールが弱い。
- ・ 生コンの協会単価との兼ね合いで、コストが合わない。
- ・ 製造、施工する側にとって、価格などのメリットが明確になっていない。
- ・ フライアッシュコンクリートの販売価格が一般品と同じであり、メリットがない。

【環境】

- ・ 当社の主力事業であるプレストレストコンクリート橋に関しては、発注者の仕様が『普通セメント』になっていることが、普及が進まない要因になっていると考えられる。発注者の仕様に追加してもらうためには、環境負荷の低減効果や耐久性・長期強度などの品質面の向上を積極的に PR していく必要があると考えられる。その中でも、『産業副産物の有効利用』や『CO₂排出量の削減』などの環境負荷低減の PR が重要になってくると思われる。

〔製造設備〕

- ・ 生コン JIS 規格では、混和材を使用する場合、セメントとの累加計量は認められておらず専用の計量器と貯蔵サイロが必要である。サイロがない場合、袋物となり大量出荷は無理。この設備投資分の回収が難しい。当然、スポット対応が難しい。
- ・ 生コンの JIS 認定の問題。
- ・ 作業所近傍に JIS のフライアッシュ生コン、高炉スラグ微粉末生コンを出荷できるプラントが少ない。
- ・ 官公庁の発注が増えると、生コン工場の設備投資の問題も解決される。

〔配合・混和材の特徴〕

- ・ 効果や影響が理解されていない。
- ・ 配合の決定に時間と費用を要する。
- ・ 特にフライアッシュの場合、性状が不安定というイメージが払拭できていない。
- ・ 実際の施工では、養生期間や脱型時期の決定、品質管理のいずれも強度発現が中心であり、フライアッシュや高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは材齢初期の強度発現が小さく、養生不足による収縮ひび割れ発生など、特に寒冷地では管理事項が多くなり敬遠されていると思う。
- ・ 材料の安定供給も普及に関わる大きな要素である(石炭火力発電所、製鋼所の減少、原材料の品質)。
- ・ 耐久性への懸念を払拭する研究は数多くされていることから、このような知見が広く認知される必要がある。

(2) 使用項目

【Q8】「これまで産業副産物起源のコンクリート用混和材を使用して、または、使用を検討して問題や不安になった点」を列挙してください。

この設問に対して、下記の回答が得られた。

〔流通システム・基準〕

- ・ 公共工事で使用する際、監理者および発注者への理解と承諾。
- ・ 各種事業者の基準や要領にない材料は使用を検討していない。

〔社会事情〕

- ・ 産業副産物の受け入れ態勢の社内整備。
- ・ 粉体量が必要な配合に対してフライアッシュより石灰石微粉末を選択する場面が多かった。

〔コスト〕

- ・ 生コン協会単価との兼ね合いでの単価アップ.
- ・ 高炉スラグ微粉末を使用することで、コンクリートの性能を向上できるが、価格がセメントに比べて高いことが多く、コストアップとなる.
- ・ 地方により混和材の入手のしやすさに差があることやコスト(輸送コスト含む)の問題.

〔製造設備〕

- ・ 特殊混和材による混成(設備・製造要領).
- ・ 高炉スラグ細骨材の保管.
- ・ 生コン工場の設備問題(貯蔵設備などのサイロが二つ必要)
- ・ 工場設備の問題(サイロ数・投入)
- ・ 自社工事でフライアッシュをコンクリートに利用している. 供給に関しては自社プラントとは限らないため、設備等を含めた供給体制の調整が必要となる.
- ・ フライアッシュセメント：貯蔵サイロ投入の際の比重差による分離ばらつきの問題.

〔配合・混和材の特徴〕

- ・ フレッシュ性状の維持(安定したエア量とスランプの安定確保, 化学混和剤との相性や組み合わせ).
- ・ 寒冷地使用であることが最低条件なので, 凍結融解に対する抵抗性の検証が必要となった. 具体的には, 空気量と気泡間隔係数, 耐久性指数の相関実験を行い, 最も気泡間隔係数が小さくなる AE 助剤を用いることで, 高い耐久性が得られた.
- ・ 強度発現が遅いため, 型枠存置期間が長くなる(型枠脱型, 支保工解体).
- ・ 冬季施工の際は, 普通ポルトランドセメントに比べて給熱保温養生の日数が増加するため, 養生費が増える(置換率によっては混合セメント扱い).
- ・ 冬季施工の際は, 強度発現性が遅いため, 初期凍害を受けるリスクが増加する.
- ・ 主に建築工事で高炉スラグ微粉末, フライアッシュを用いた場合の中性化.
- ・ 養生期間の確保(短期間で強度が出た場合でも, 湿潤期間の標準日数は確実に実施).
- ・ 実環境下における収縮ひび割れ.
- ・ コンクリートの色合い.

【Q9】「産業副産物起源のコンクリート用混和材が JIS 規格を外れていても、使用場所や用途によっては既存の施工技術で充分利用可能である。」と思いますか？

この設問に対して、下記の回答が得られ、可能であると判断した方が約半数を占めた。

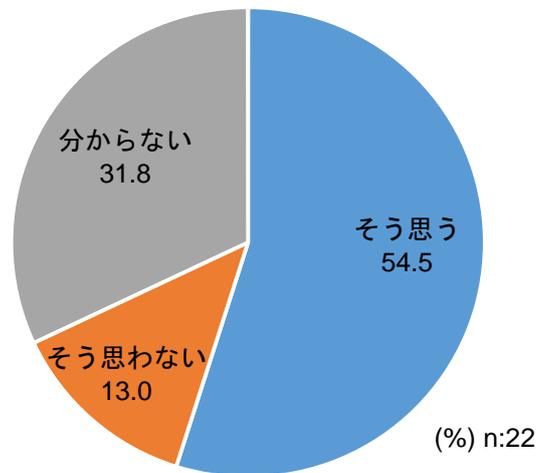


図 3.2.4 Q9 回答結果

【Q10】「JIS 規格を外れた産業副産物起源のコンクリート用混和材を使って、ユーザーの望む生コンクリートやコンクリート製品を製造・施工するノウハウを作業員が持っている。」と思いますか？

この設問に対して、下記の回答が得られ、「そう思う」との回答が 3 割程度であった。Q9 の回答結果を踏まえると、作業員以外の管理者がノウハウを有していることがうかがい知れる。

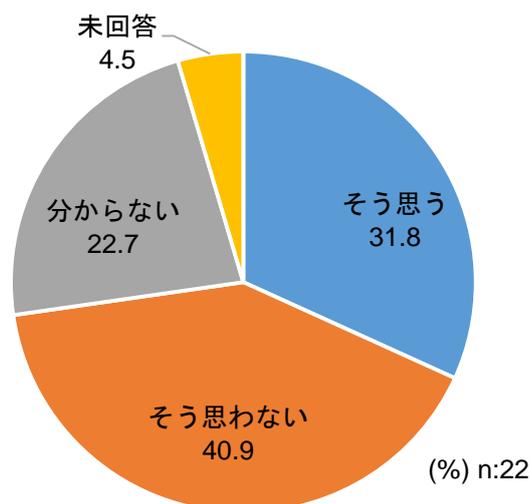


図 3.2.5 Q10 回答結果

【Q11】 その他ご意見がありましたら、自由に記載してください。

この設問に対して、下記の意見が得られた。

【流通システム・基準】

- ・ 発注者サイドの後押しがないと普及しないと思う。製造者、設計者、施工者がいくらアピールをしても、結局労力の無駄になる可能性が高いため、採用が検討されることも希である、というのが現状である。よって、発注者からの活用促進の動きが必要と思う。
- ・ フライアッシュに関して使用にあたっては、発注者(官公庁)に限らないが認知度が低いため、承諾してもらうには労力を要しているのが現状だと思う。
- ・ 生コンの場合、発注者側からの指定があれば使用が検討される。当社は設備を整え、対応できる態勢にあるので、フライアッシュの指定があれば対応する。

【社会事情】

- ・ 産業副産物の普及の弊害要因としては、施工者側のメリットが小さいことも考えられる。
『使用実績がない』あるいは、『使用実績が少ない』材料を使用する際は、どのような問題が潜んでいるかわからないというリスクが存在する。企業は『リスク回避』を優先する傾向にあり、普及が進まない要因になっていると考えられる。そのような中でも産業副産物を普及させていくためには、リスクを考慮に入れても、施工者が使用したくなるような『メリット』が必要になってくるかと思われる。例えば、
 - ✓ 原価メリット(材料費が安くなり利益が増える。環境負荷低減材料を使用したとして国から補助金が出る)
 - ✓ 工程メリット(作業効率が向上し、工程短縮が図れる)
 - ✓ 工事評価点で加点となり、受注機会の増加に繋がる技術的な課題解決はもちろんだが、上記のような経済的側面を取り入れていくことが、普及促進には必要であると思われる。
- ・ 混和材の普及のためには、①コンクリート構造物に携わる設計者、施工者、製造者側に何らかのメリットが得られる仕組み作り、②JIS品を中心とした安定供給体制(需給バランスの確保)が必要であると考えられる。デメリットとなる技術面、コスト面、安定供給体制の課題を解決して、使用する側に何らかのメリットが得られれば普及の可能性はあると考える(地域性もあると思われる)。
- ・ 昭和50年代後半まで、混合セメントはフライアッシュセメントB種を使用していた(苫小牧基地から納入されていたエリア。道東方面は高炉B種を使用)。品質の低下、安定供給の問題で高炉セメントB種に切り替わったが、切り替え直前は品質が安定せず苦労した記憶が強く残っている。ベテランの技術者で使用経験のある方はアレルギーがあるのではないか。

〔コスト〕

- ・ 産業副産物起源のコンクリート用混和材の使用を増やすためには、品質面と同時にコスト面も考慮しないと普及するのは、難しいと思う。
- ・ 普通コンと同品質で低コストの実現。同品質以上であることは証明できると思われるので、コストメリットがあり認知されれば普及するように思われる。

〔環境〕

- ・ パリで開催された気候変動による国際会議「COP21」でも地球温暖化対策について議論されていた。産業副産物起源のコンクリート用混和材を使用することは、温暖化対策にも貢献できることなので、各人の利益にとらわれない成熟した考えで進めていくことを切に望む。
- ・ セメントの60%を高炉スラグ微粉末で置換すると、セメント製造時に発生するCO₂を大きく削減できることは明らかであり、このようなセメントが標準的になれば地球温暖化に対する問題解決に貢献できる。

〔製造設備〕

- ・ 現場打ちコンクリートのマスコン対策として、フライアッシュを使用したいと考えたこともあるが、供給面や生コン工場の設備の問題から、採用を断念したことが多々ある。

〔配合・混和材の特徴〕

- ・ 当社の工場ではコンクリートミキサーの形状が多種多様(ジクロス、強制2軸、1軸、パン型、傾胴2軸ミキサー)で、当然、骨材にも共通性(砕砂、川砂、川砂利、採石、球砕)がない。また、混和剤も共通性(オキシカルボン酸、リグニンスルホン酸、メラミン酸、アミノスルホン酸、ポリカルボン酸)がない。このような状況で、統一のデータで物事が進むわけがなく、絶えず試験練りが付いて回る。

産業副産物を利用した場合、これらの違いがどのように影響するのか、また、今後の本委員会で試験を実施していく場合、共通の材料を用いて実施し、また、使用材料の明記を行わないと参考にならないと思われる。なお、AE剤の主剤(樹脂酸塩、非イオン系)が異なるだけで同一の空気量においても凍結融解抵抗性も変わるし、スランプも変わる。

- ・ 混和材自体の品質の安定が不可欠であり、これに加えて製造技術に問題のないプラントからの供給であれば施工できる。
- ・ 作業員は搬入されたコンクリートを打設するしかしない。製造に関しては、プラント技術者だけで配合を決定するのは厳しい。混和剤メーカーの技術者による支援が必要である。
- ・ 産業副産物起源の混和材(高炉スラグ微粉末、フライアッシュ)は、コンクリートの温度上昇抑制や塩化物浸透抑制(遮塩性)などのメリットを有している。一方、凝結遅延や初期強度低下などのデメリットも併有している。特徴を生かした適材適所で使用を検討することが必要と考える。
- ・ 大学などの多くの研究機関は、材料のポテンシャル評価をしているのが一般的であり、使用者および製造者側に立った研究成果が少なく、誤解されやすい性能表示がされていると

思う。多くの場合、呼び強度、スランプ、粗骨材最大寸法によりコンクリートは区別されているので、その区分毎の性能、価格などのメリットおよびデメリットを分かりやすく標記し、理解してもらうことも必要と考える。

- 養生を確実に実施することにより、一般的なセメントより耐久性が向上することは明らかで、積極的に使う環境を整備することが重要である。そのためには、発注者、施工者、材料供給者、コンクリート製造者が一体となって取り組む必要がある。
- 混和材の利用による構造物の遮塩性能向上やアルカリシリカ反応抑制といった効果については一般的に認められている。しかし、初期強度発現性や中性化抵抗性については混和材未混入のコンクリートに比べ遜色ない性能であることは、学術的に認められているが、一般的には認識されていないようである。CO₂排出抑制や枯渇しつつある天然資源の保全といった環境負荷低減のため、産業副産物の利用拡大が推進されているところではあるが、コスト検討に反映されるような混和材の効果についての認識を広め、利用されやすい環境作りを進める必要がある。

3.2.2 第1回アンケート集計結果の総括

概ね産業副産物起源のコンクリート用混和材の利用や扱い経験はあるが、その時に得られたノウハウは隅々までに行き渡っていない傾向がある。また、その時の経験から得られた「流通システム・基準」、「社会事情」、「コスト」、「環境」、「製造設備」、「配合・混和材の特徴」に分けられる不安や課題が明瞭化した状態で滞っている。そして、それは現在でも払拭されておらず、普及に繋がっていない傾向も垣間見える。

3.2.3 第2回アンケート集計結果

第2回のアンケートでは、「産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究小委員会」のワーキンググループ1委員より7名9件、ワーキンググループ2委員より8名・26件、合計35件の回答を頂いた。回答者の職種および業務の形態を図3.2.6、図3.2.7に示す。アンケート回答者の延べ人数で見ると、総合建設業で施工の業務に携わっている回答者の比率が高くなっている。

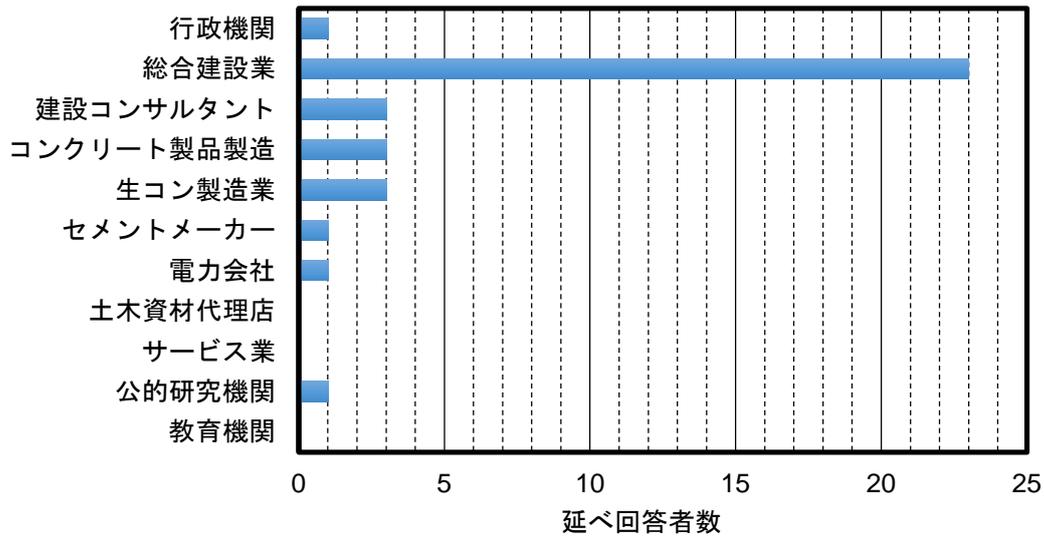


図 3.2.6 アンケート回答者の職種

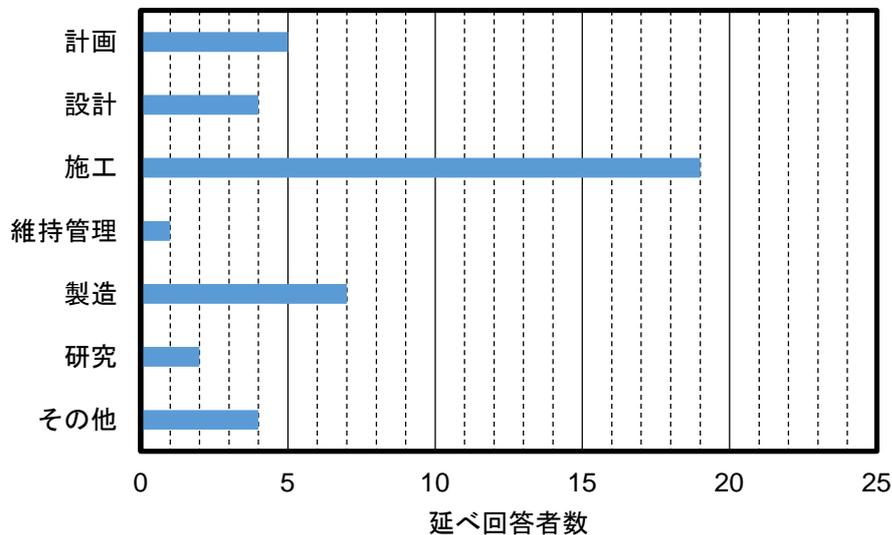


図 3.2.7 アンケート回答者の業務形態

第2回のアンケートでは、産業副産物起源のコンクリート用混和材のうち、フライアッシュと高炉スラグ微粉末に限定して調査を行った。回答を求める使用実績には、フライアッシュセメントA～C種、高炉セメントA～C種の混合セメントも含めることとした。アンケート回答数の内訳は、フライアッシュに関するものが28件、高炉スラグ微粉末に関するものが15件であった。

(1) フライアッシュに関するアンケート結果

アンケートではまず、アンケート回答の対象とした事例で用いたフライアッシュの使用形態、種類について確認した。結果を図 3.2.8 に示す。フライアッシュの利用では、JIS II 種フライアッシュの使用が最も多く、次いでフライアッシュセメント B 種、C 種としての使用が多いことがわかる。

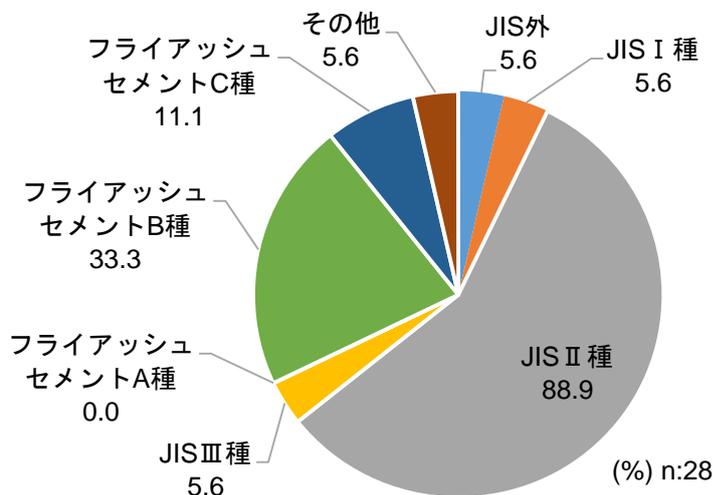


図 3.2.8 アンケート回答の対象となったフライアッシュの種類別

1) 積雪寒冷地での使用実績／研究実績について

【Q1-1】フライアッシュを使用／研究することになった目的を可能な範囲で記載してください。

この設問では、記述式で回答を求めた。回答欄に示された記述を、それぞれ「発注者の指示・仕様書規定」「技術的な要求」「地球環境への配慮」「経済的メリット」「研究目的」に分類して以下に示す。

〔発注者の指示・仕様書規定〕

- ・ 仕様書指定(粉体量の 20～30%)。
- ・ 発注者からの要請(フライアッシュの利用促進)。
- ・ フライアッシュの有効活用が仕様書に規定されていたため。
- ・ 発注者の仕様書指定。
- ・ 特記仕様書指定(フライアッシュの置換率 30%)。
- ・ NEXCO トンネル施工管理要領により、中流動覆工コンクリートを製造するにあたり設備の増設を行った。それに伴いフライアッシュを標準化した。
- ・ 仕様書指定(中流動コンクリートの混和材として 100kg/m^3 を使用)。
- ・ 特記仕様書指定 100kg/m^3 。
- ・ ダム物件での仕様指定。

【技術的な要求】

- ・ 地下構造物の水密性向上と水和熱の低減に伴うひび割れの抑制に期待した。
- ・ 高流動コンクリートの流動性(自己充填性)に寄与させるために粉体量の増量分として、フライアッシュセメント B 種にフライアッシュ II 種を 40kg/m^3 添加した。
- ・ 高層ビルにおける耐圧盤等のマッシュなコンクリートの発熱抑制を目的としてセメント量の低減ために利用することが多い。
- ・ 施工者より発熱温度の低減。
- ・ 特記仕様書の標準配合(中流動コンクリート)より、リバウンド・粉じん低減のため(吹付けコンクリート)。
- ・ ワーカービリティ確保, 初期ひびわれ抑制。
- ・ アルカリシリカ反応の抑制, 環境負荷の低減, マスコン対策。
- ・ マスコンクリートの温度ひび割れ抑制。
- ・ 耐久性向上などのコンクリートの品質向上効果。

【地球環境への配慮】

- ・ 現場環境側面より, トンネル工事の吹付けコンクリートにフライアッシュを使用。現地調達
の砂の品質に問題があったため, フライアッシュを細骨材の置換で使用(40kg/m^3 で置換)。
- ・ 周辺環境的側面より, CO_2 排出量の削減, 天然資源(コンクリート材料)の使用量抑制。
- ・ 社会的要請(CO_2 排出量低減, 最終処分場問題)および学会指針等へのデータ提供等。

【経済的メリット】

- ・ 粉体系高流動化コンクリートを用いる時の材料として活用している。セメントより安価で入手できることが主な目的である。
- ・ セメント削減により経済性が高い配合とすることが可能。

【研究目的】

- ・ 有効利用に伴う研究。

分類した回答の比率を図 3.2.9 に示す。有効な記述 26 件のうち、「発注者の指示・仕様書規定」に分類されるものが 42.9%(12 件)と最も多く、建設工事におけるフライアッシュの採用は、発注者の意思・意向に大きく依存することがわかる。一方で、マスコンクリート対策やアルカリ骨材反応対策など技術的要求からフライアッシュを採用したとするケースも 35.7%(10 件)あった。この中には発注者の立場からの回答も含まれているが、技術的課題の解決のために積極的にフライアッシュを使用するケースも多いと言える。これらの他は、地球環境への配慮が 7.1%、経済的メリットが 3.6%、研究目的が 3.6%の回答であった。このうち経済的メリットは、コンクリート製品製造の立場からの回答である。

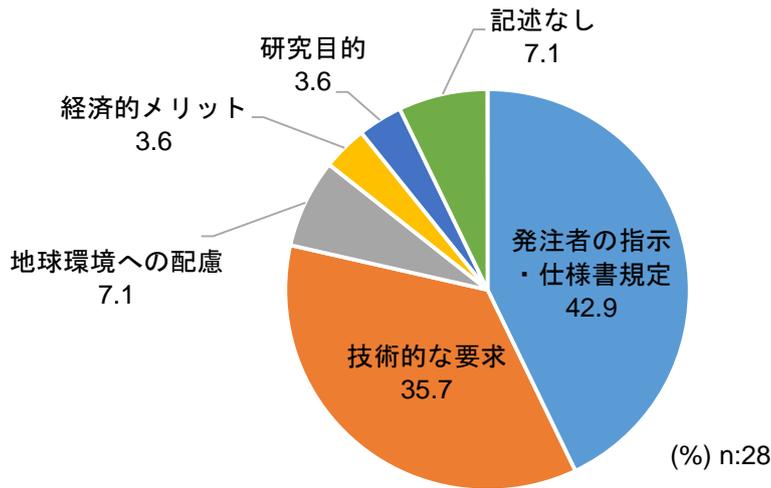


図 3.2.9 フライアッシュを使用することになった理由

【Q1-2】 積雪寒冷地でフライアッシュを採用／研究対象とした場面はどこですか？

この設問に対しては、アンケートに示した選択肢から一つを選んでの回答である。その結果を図 3.2.10 に示す。

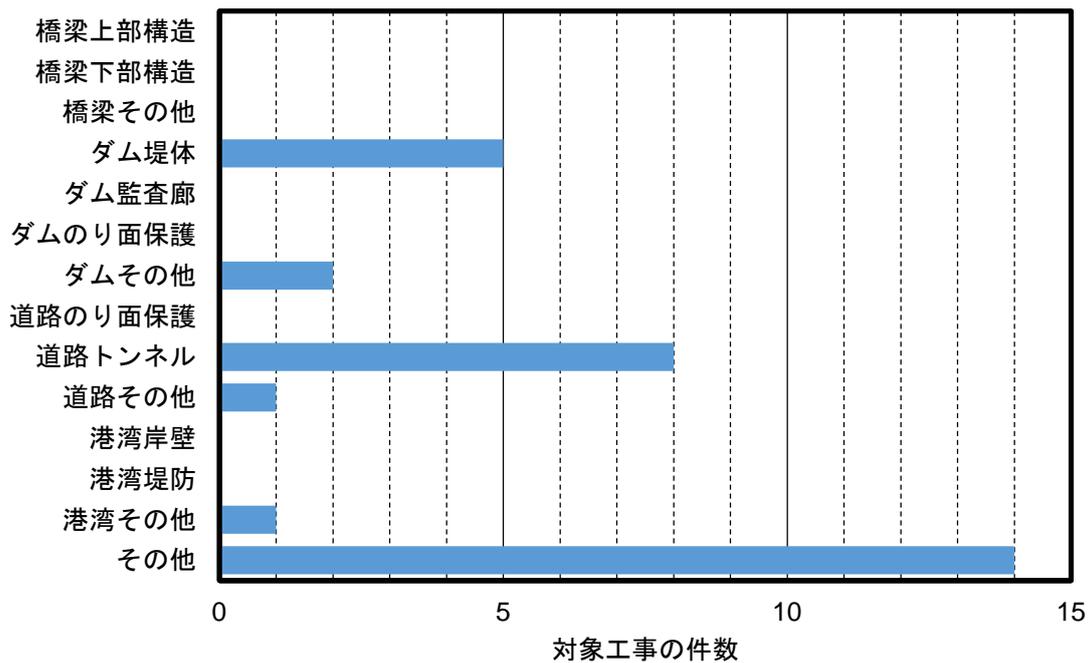


図 3.2.10 アンケート回答の対象工事の種類(回答 31 件)

アンケート回答の選択肢は、大きく橋梁、ダム、道路に分類して用意したが、実際に多くの回答があったのは、ダム堤体(5件)、道路トンネル(8件)であり、その他が合わせて18件であった。その他の内訳は、エネルギー施設、LNGタンク、水力発電所、高層ビルの耐圧盤などである。

2) 材料品質について

【Q2-1】 JIS で規格されたフライアッシュを使用／研究するにあたり、品質について考慮した項目は何ですか？

この設問に対しては、アンケートに示した選択肢からの回答である。ここでは複数回答を可としている。回答の内訳を図 3.2.11 に示す。回答ではフライアッシュの品質変動を指摘したものが 24%(12 件)と最も多く、フライアッシュの品質変動による空気量コントロールの難しさなどを反映していると推察される。一方で、フライアッシュの品質は考慮していないとする回答も 20%(10 件)あった。この中には、フライアッシュの使用が発注者の指示や材料指定であるため、回答者の側に選択権がないケースが含まれているものと思われる。

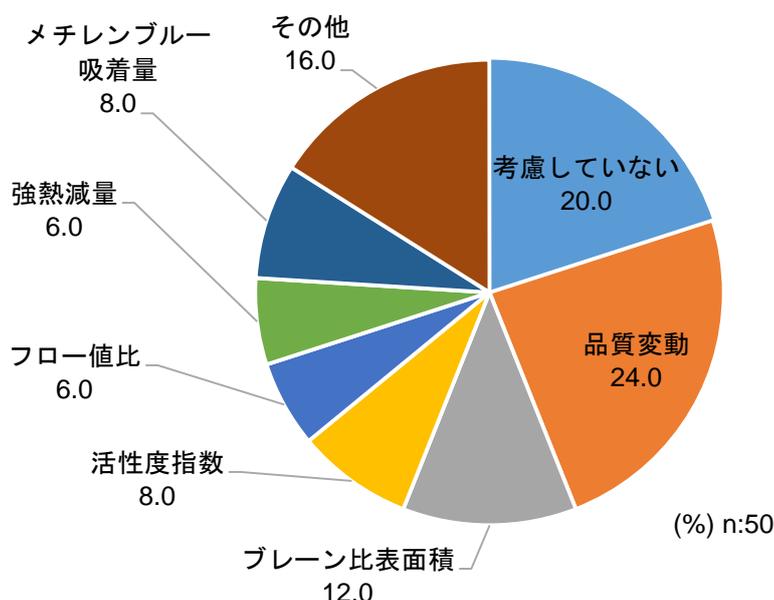


図 3.2.11 フライアッシュの品質について考慮した事項

また、この設問では、「その他」の回答あるいはフライアッシュセメントを用いたケースのために自由記述欄も設けている。自由記述欄に記載されていた内容は以下の通りである。

- ・ 材料指定のためフライアッシュ自体の品質は考慮していない。
- ・ 特になし。
- ・ 吹付けコンクリートのため、施工性に留意している。
- ・ 品質変動。
- ・ 凝結時間。
- ・ コンクリートの空気量。
- ・ 計画段階でフライアッシュ利用によるコンクリートの品質や経済性を検証し採用している。JIS 規格に上乘せた自社基準での製造を行っており、使用時に考慮していない。
- ・ フライアッシュを使用する場合には、空気量の安定化対策は必須である。フライアッシュの導入開始時、工場出荷時のメチレンブルー吸着量を参考にして AE 剤の量を決めた。フライアッシュの導入開始時、しばらくの間全車のメチレンブルー吸着量を試験した。

3) 積雪寒冷地での配合について

【Q3-1】フライアッシュの使用を設計／研究に取り入れた時に着目した項目は何ですか？

この設問に対しては、アンケートに示した選択肢からの回答である。ここでは複数回答を可としている。回答の内訳を図 3.2.12 に示す。これによると、ワーカビリティ、強度発現特性、長期強度発現性、水和熱の回答が多くなっており、ここには建設施工に関係する回答者が多いことが反映されており、フライアッシュコンクリートの積雪寒冷地における初期強度発現特性に対する懸念が示されている。続いて凍害、空気連行性との回答が多く、フライアッシュの品質変動による空気量のコントロールに対する懸念が示された。

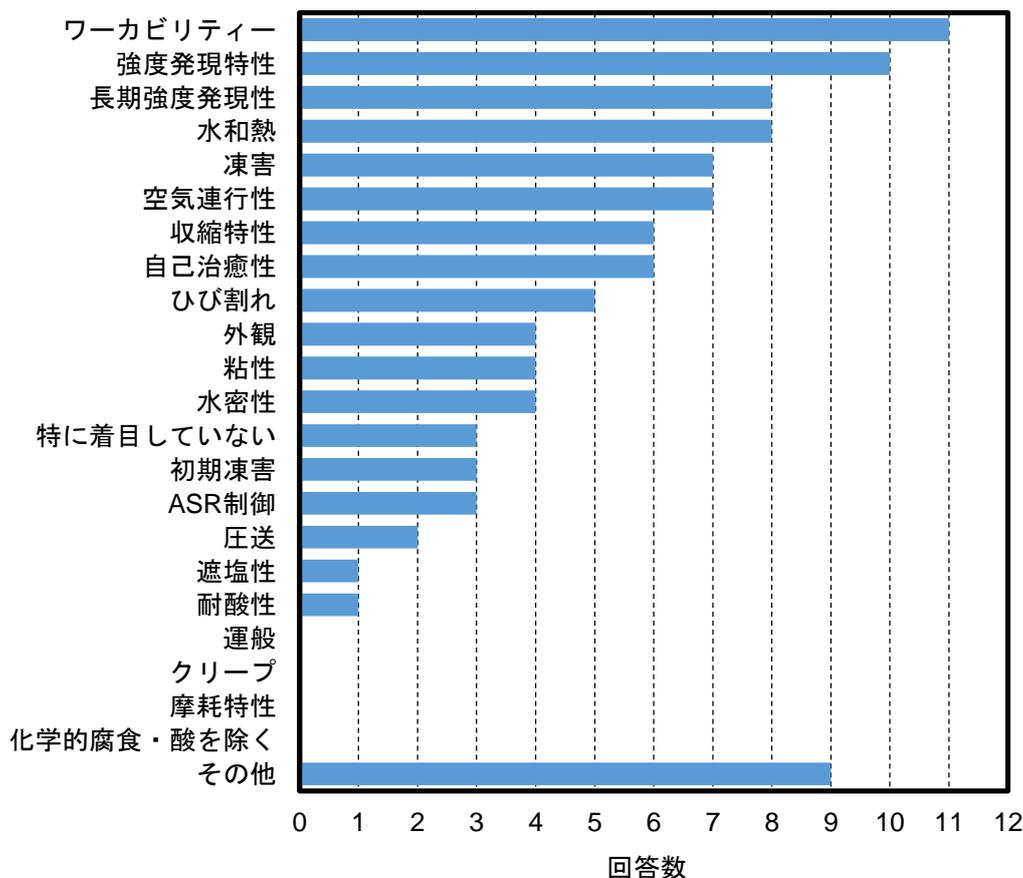


図 3.2.12 フライアッシュの使用を検討した時に考慮した事項(回答 102 件)

また、この設問では「その他」の回答に対して自由記述欄を設けている。自由記述欄に記載されていた内容は以下の通りである。中には、フライアッシュ使用の意義やメリットを強調した記述や、具体的な空気量の管理方法に言及した記述がある。

- ・ スランプ保持性能(経時変化、高性能 AE 剤後添加後のスランプ)、打ち重ね時間間隔・若材齢圧縮強度(プロクター貫入試験・S 式および N 式貫入試験)、打継ぎ処理剤性能(曲げ強度試験)。
- ・ 吹付けコンクリートのリバウンド低減のために使用した。

- ・ 高炉セメントに比べ断熱温度上昇量が低い，高炉セメントに比べ乾燥収縮ひずみが小さい(収縮ひび割れの抑制)，ポゾラン反応により材齢 91 日以降も圧縮強度が増加する，コンクリート組成の緻密化，北海道の工事であり道産品の使用を考慮した(苫東厚真石炭火力発電所産)，グリーン購入法に基づく調達品目である。
- ・ 高流動コンクリートにおける自己充填性。
- ・ 強度発現性，初期凍害，長期強度発現性については試験練りを行い，初期強度から 91 日までの強度発現状況を確認した。空気の連行性については，フライアッシュのロットでの変動を日常的に管理している。
- ・ コンクリートの発熱抑制。
- ・ 初期凍害に対して，フライアッシュ未混入の配合と遜色ないことを確認している。凍害に対しては，長期強度増進に伴う抵抗性の向上や，自己治癒性による長期的な健全性確保に着目している。
- ・ 耐久性(中性化速度)。
- ・ 冬期間の初期強度発現性は低いので，厳寒期は配合修正の必要がある。自己修復性能については，研究機関での実験データからも確認されているが，フライアッシュの使用量と自己修復性能の関連性について客観的データがあれば良いと思う。

【Q3-2】最終のフライアッシュコンクリートの製造場所，配合および養生方法を教えてください。

この設問では，コンクリートの配合計画・配合設計の考え方についていくつかの項目に分け，それぞれアンケートに示した選択肢から回答を求めている。

□コンクリートの製造場所

図 3.2.13 に，事例として取り上げたフライアッシュコンクリートの製造場所に関する回答結果を示す。全 28 件の回答のうち，生コン工場との回答が 53.6%(15 件)と最も多く，次いで現場仮設プラントの 35.7%(10 件)となった。現場仮設プラントの中には，トンネルの施工における吹付けコンクリートのプラントも含まれている。さらに製品工場との回答が 2 件あり，その他の回答 1 件は，研究レベルでの実験室での練混ぜである。

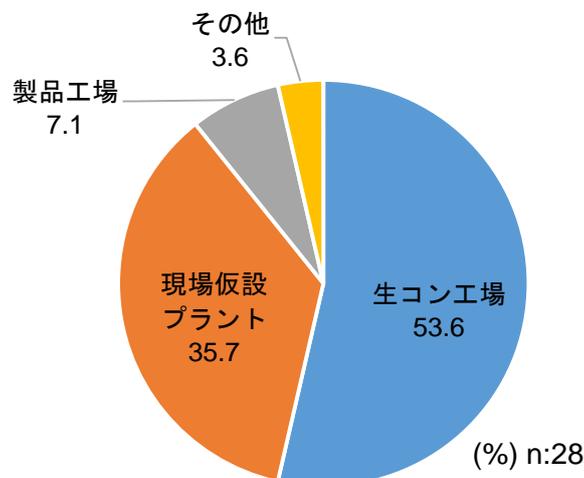


図 3.2.13 コンクリートの製造場所

□強度指定材齢と設計強度・呼び強度

図 3.2.14 に強度指定材齢(強度保証材齢)に関する回答結果を示す。その結果、フライアッシュコンクリートの強度指定材齢は通常のコンクリートと同様に 28 日が圧倒的に多いことがわかる。フライアッシュコンクリートの強度発現は緩慢とされているため強度指定材齢を 91 日など長く設定する場合もあるが、フライアッシュの使用目的によっては、通常のコンクリートと同様にやっている場合が多いようである。

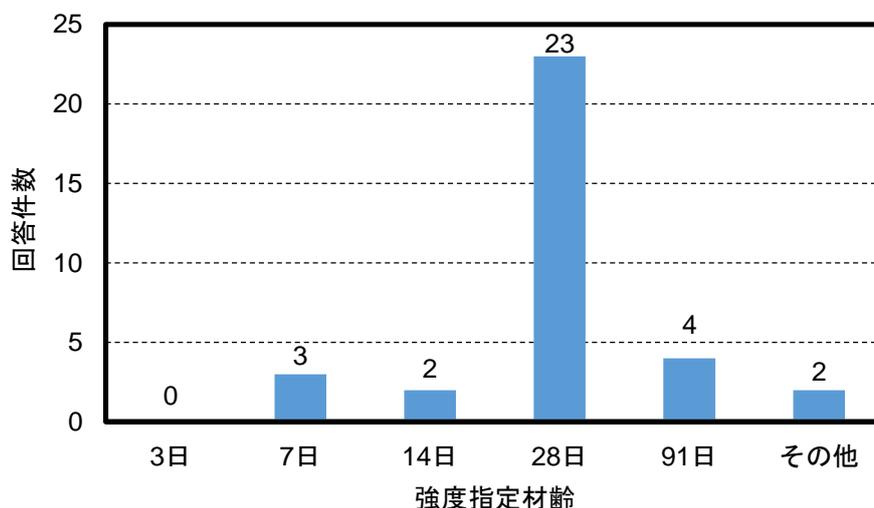


図 3.2.14 強度指定材齢の設定(回答 34 件)

回答があった事例の設計強度の分布を図 3.2.15 に、呼び強度の分布を図 3.2.16 に示す。図 3.2.15 の集計結果は、アンケート用紙に記載の設計強度の選択肢に誤りがあり、設計強度 24N/mm²および 40N/mm²が前後の強度範囲に重複した設問となっていたため、実際の回答件数は各強度範囲で多少増減すると思われる。一方で図 3.2.16 の呼び強度の分布の傾向をみると、コンクリートの強度は 24~27 のものが中心であり、最大でも呼び強度では 40 であった。回答された事例には橋梁上部工等は含まれておらず、フライアッシュは高い強度を必要としない構造物で用いられていると言える。

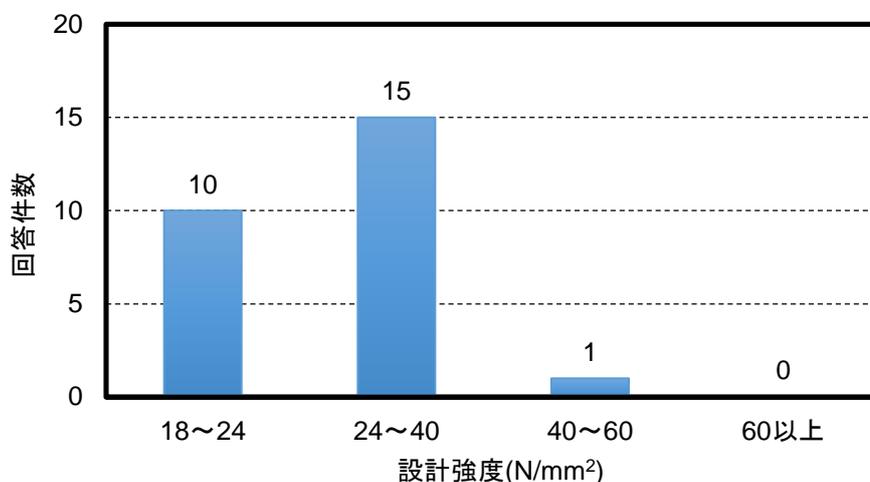


図 3.2.15 コンクリートの設計強度の分布(回答 26 件)

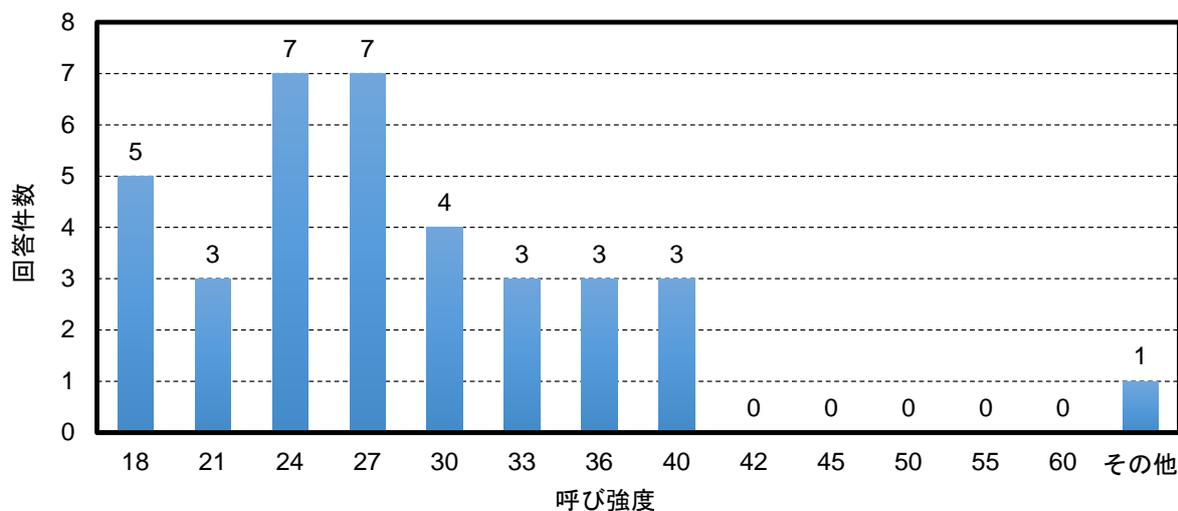


図 3.2.16 コンクリートの呼び強度の分布(回答 36 件)

□混和材としてのフライアッシュの使用方法

図 3.2.17 に、混和材としてのフライアッシュの使用方法に関する回答結果を示す。フライアッシュⅡ種を混和材として用いる場合の多くは普通ポルトランドセメントとの組み合わせであり、早強ポルトランドセメントと組み合わせたケースはなかった。混合セメントとして用いた場合は、フライアッシュセメント B 種を用いたケースが 23.1%(6 件)、C 種を用いたケースが 3.8%(1 件)である。その他の 11.5%(3 件)は、すべて中庸熱ポルトランドセメントとフライアッシュを組み合わせたケースであり、これらはマスコンクリート構造物における温度ひび割れ制御に対する技術的要求に対し、コンクリート水和熱低減策としてフライアッシュが積極的に用いられたケースであると言える。

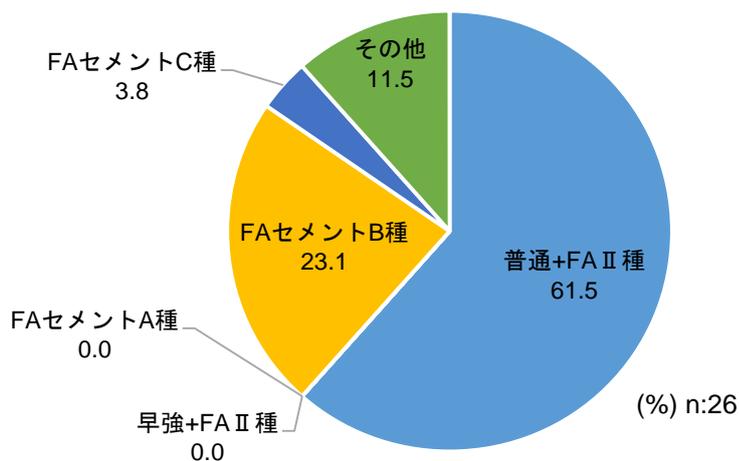


図 3.2.17 混和材としてのフライアッシュの使用方法

□フライアッシュ添加の考え方(フライアッシュセメントは除く)

ここでは、配合計画時におけるフライアッシュ添加の考え方について、アンケートに示した選択肢の中から回答を求めた。結果を図 3.2.18、図 3.2.19、図 3.2.20 に示す。

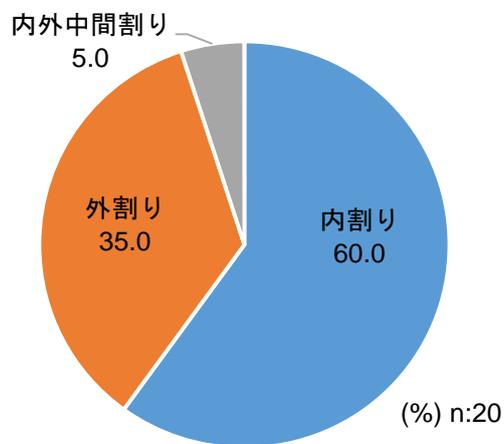


図 3.2.18 配合計画におけるフライアッシュ置換の考え方(1)

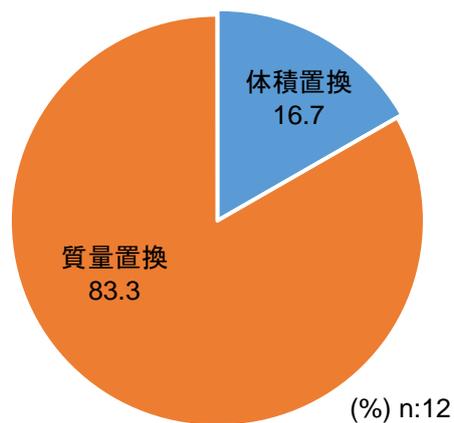


図 3.2.19 配合計画におけるフライアッシュ置換の考え方(2)

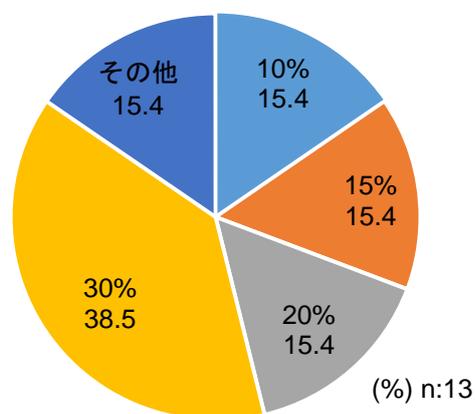


図 3.2.20 フライアッシュ置換率

図 3.2.18, 図 3.2.19 によると, アンケートに回答された事例では, フライアッシュを内割り置換で配合計画を行ったケースが 60.0%, フライアッシュを質量置換で用いて配合計画を行ったケースが 83.3%となっており, フライアッシュ利用現場の多くではフライアッシュを結合材の一部と見なし, 水結合材比 $W/(C+FA)$ をベースに配合設計を行っている と推察される. フライアッシュを外割り置換で使用しているのは, 高流動コンクリートあるいは中流動コンクリートの製造で, フライアッシュを粉体量の一部と見なしたケースである. また, トンネルの吹付けコンクリートの施工で, 細骨材の品質を補うためにフライアッシュを細骨材の一部と置換して用いた事例が 1 ケースあった. 図 3.2.20 では配合計画でフライアッシュ置換率 30%とした事例が 38.5%と最も多く, 混和材としてフライアッシュを使用する場合には, 置換率をすべてのフライアッシュがポゾラン反応するとされる上限近くに設定し, 可能な限りフライアッシュを有効利用する試みがなされていることがわかる.

□養生方法について

コンクリートの養生方法については, A 散水, B 湿布, C 封緘, D 養生剤(被膜剤), E 給熱, F 断熱, G 標準, H 常圧蒸気, I その他の選択肢の中から複数選び, それらの組み合わせで, それぞれを何日実施したかという形で回答を求めた. 回答された内容はそれぞれの事例でケースバイケースという状況であった. また, 施工時期についても 1 月から 12 月までの選択肢を示し回答を求めたが, 結果として回答されたのはコンクリート工の工期であったと思われ, アンケート結果から養生方法と施工時期の間に有意な関係を見出すまでには至らなかった.

4) 施工時・施工後のフライアッシュコンクリートの状況について

【Q4-1】フライアッシュを採用／研究した時, 施工時やその後に何か副次的な成果としてのメリットがありましたか?

この設問に対しては, アンケートに示した選択肢からの回答である. ここでは複数回答を可としており, 計画当初には期待していなかった効果, あるいは計画当初に期待した効果に加えて実際にフライアッシュを使用して見て感じられた効果やメリットについての回答を求めた. 回答の内訳を図 3.2.21 に示す.

実際にフライアッシュを利用して感じられる効果では, 流動性改善(11 件), 材料分離抵抗性改善(9 件)について多くの回答があり, フライアッシュの添加によってコンクリートのワーカビリティの改善に期待できることがわかる. 次いで多くの回答があったのは, 温度ひび割れ制御(9 件), 長期強度発現性(7 件), 環境問題の改善(7 件)と続くが, これらはフライアッシュを使用して見て感じられた効果というより, フライアッシュの活用によって得られる一般的なメリットであり, このような項目がフライアッシュの効果として広く認識されていると言える.

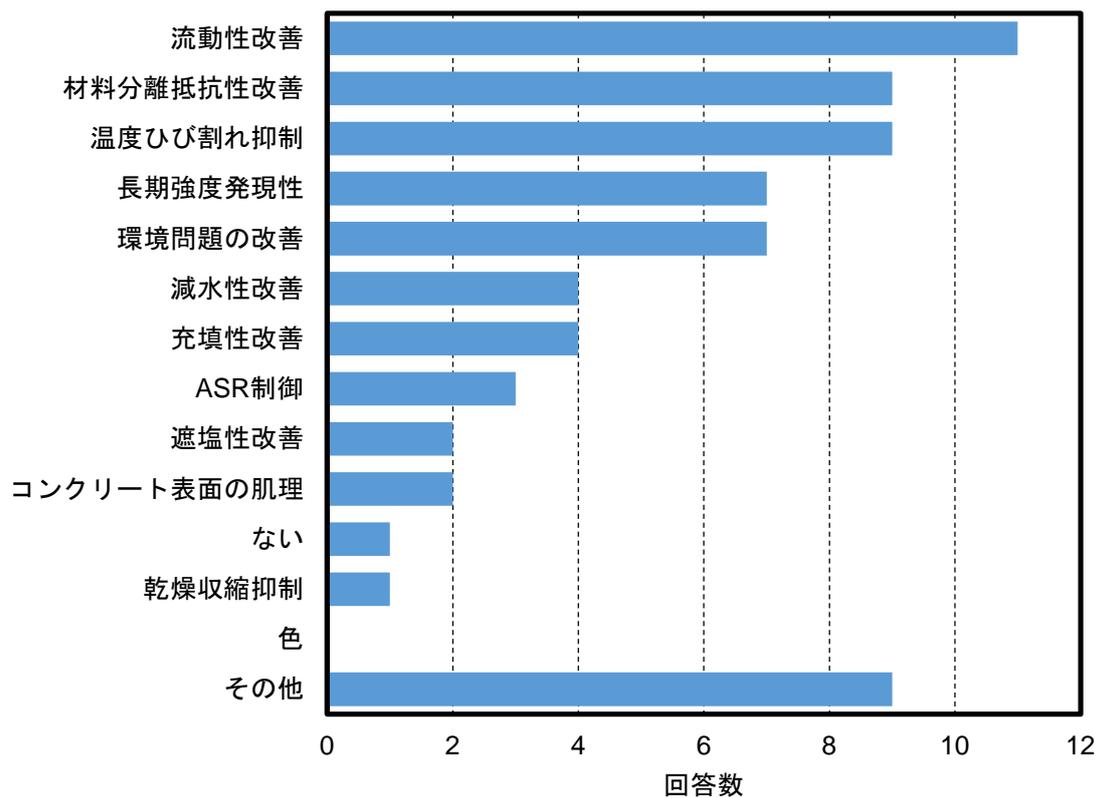


図 3.2.21 フライアッシュ利用による副次的な効果(回答 69 件)

また、この設問では「その他」の回答に対して自由記述欄を設けている。自由記述欄に記載されていた内容は以下の通りである。

- ・ ワーカビリティが良く、ブリーディング水の発生が少ない。
- ・ ダムはマスコンクリートであるため、減水による単位セメント量の低減、水和熱低減による温度ひび割れ抑制の効果を期待している。
- ・ 吹付けコンクリートの付着が若干良好になった(リバウンド率の低減が良くなった)。
- ・ 吹付けコンクリートの試験練りにおいてフライアッシュを使用しない場合 $W/C=65\%$, $s/a=60\%$ 程度としなければ既定のスランプ値にならず、練上がりの状況とスランプ形状が良くなかったが、細骨材の置換としてフライアッシュを使用することにより $W/C=60\%$, $s/a=58\%$ で良好な結果が得られた。吹付けコンクリート圧送時のホース内の目詰まりもなく吹付けを実施できた。
- ・ 高流動コンクリートの性状は非常に安定し、流動性・自己充填性も満足の行くものであった。
- ・ マッシブなコンクリートの水和熱減少(施工者要望)、セメント量の低減ができることによるコストダウン(製造工場として)、フライアッシュのポズラン反応による長期強度発現(製造工場として)。
- ・ 中流動コンクリートについて、少ないセメント量に対し粘性、材料分離抵抗性を有するコンクリートを製造できる。

- ・ 自己修復効果, フライアッシュ未混入の配合と同一の強度発現性, フレッシュ性状(流動性・充填性)となる配合では, 粉体量は増加, 単位水量は減少および材料分離抵抗性の改善効果も高い. コンクリート組織が緻密化するため, 遮塩性など劣化因子の浸透防止の効果も高く, 構造物の高耐久化に寄与していると考えている.
- ・ フライアッシュを3割置換した高流動コンクリートでは, 高性能 AE 減水剤ではなく, AE 減水剤でフロー60cm が可能であった. フライアッシュの流動性改善効果が明確に証明された事案である. 粉体量が多くなるので, 外観が良くなった.

【Q4-2】フライアッシュを採用／研究した時、施工時やその後(経過観察)に問題や課題はありましたか？

この設問に対しては、アンケートに示した選択肢からの回答である。ここでは複数回答を可としている。回答の内訳を図 3.2.22 に示す。アンケートの回答者の多くは、フライアッシュの利用による問題や課題はないと回答している。これは、フライアッシュの使用の計画段階で課題については既に検討がなされていたか、あるいはこれらの課題を承知し受け入れての計画・採用であったことが考えられる。その中でも課題として指摘されているのは、空気連行性(5件)、AE 剤使用量(5件)、凍害(4件)であり、フライアッシュの品質変動による空気量コントロールの難しさが課題として取り上げられている。

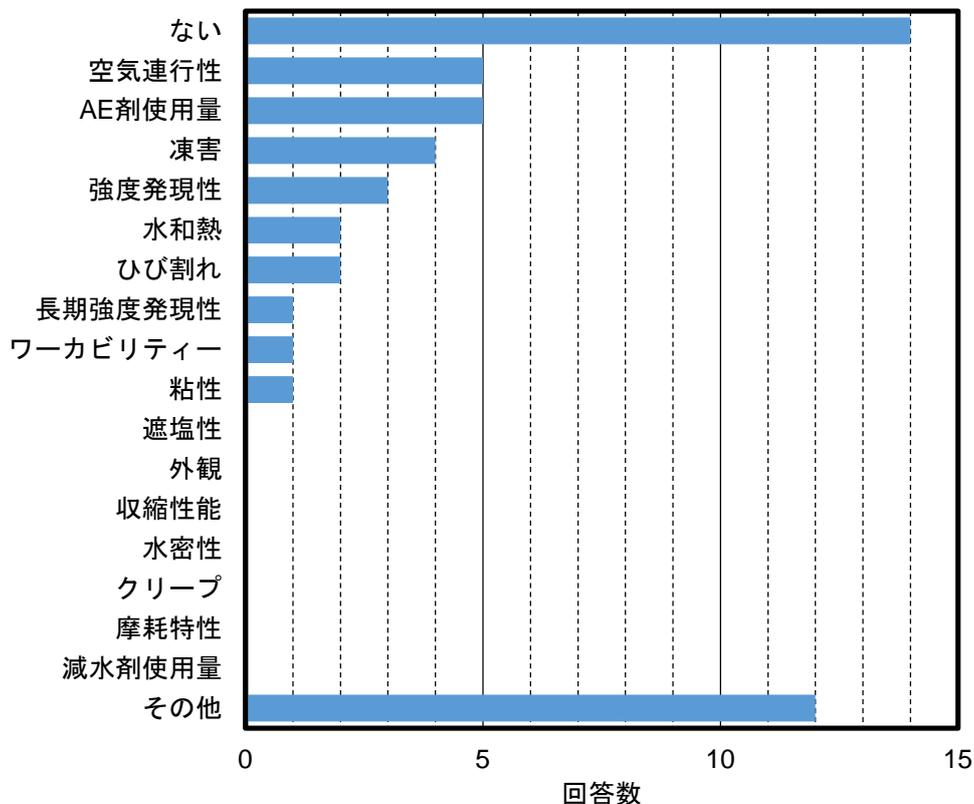


図 3.2.22 フライアッシュの利用による問題や課題(回答 50 件)

また、この設問でも「その他」の回答に対して自由記述欄を設けている。自由記述欄に記載されていた内容は以下の通りである。

- ・ 低温期の施工時は強度発現が遅いため、凍結防止のために断熱養生や給熱養生を必要とし手間がかかる。また、強度発現が遅いと次リフトの施工ができない(レイタンス処理等の施工開始時期が遅くなるため)ため、工程への影響が懸念される。
- ・ ダムコンクリートでの使用のため、マスコンクリートの水和熱抑制を期待して使用したが、10、11月の低温期は初期強度が得られなかったことから、打設面に養生マットを施工し初期凍害を防止した。
- ・ 高炉セメントに比べて、断熱温度上昇量が低く乾燥収縮ひずみも小さいと思われたためひび割れ発生の抑制を期待したが、ひび割れが意外と多く発生した。
- ・ AE剤の添加量にて空気量の調整を行った。
- ・ 空気連行性は、日常の工程管理を十分に行う必要がある。フライアッシュのロットにより空気量の変動を見逃すことないように管理しているが、この部分の変動が少なくなることを希望する。
- ・ 空気連行性が悪く、空気量調整剤を過大に使用する(通常時の3倍)。
- ・ 通常の配合と比較して空気連行性が悪く安定させるのに苦慮した。
- ・ 空気量調整剤使用量の増加による、AE剤濃度(溶解)管理が一般の配合と変動するので管理方法が若干変更となった。
- ・ 初期強度発現性に懸念があったが、フライアッシュ未混入の配合と呼び強度が同一の配合では、初期強度の発現性に差はなく施工サイクルへの影響はないことを確認している。
- ・ 中庸熱フライアッシュセメントを用いたダムコンクリートのため耐凍害性が問題となっている。空気が入りにくいいため、AE剤の使用量が増えかつ、エントレインドエアのような微細な空気が入りにくい。
- ・ 使用プラントのJIS規格品では、呼び強度を保証する材齢が28日のみであったため、水和熱の低減(マスコン対策)が図れなかった。
- ・ プレキャスト製品は蒸気養生を掛けて初期強度を担保している。しかし、冬期間に使用する場合には管理材齢14日強度が不足傾向になるため、配合修正の必要がある。ロットによる空気量の変動を考慮し、入荷したロットを全て使用してから貯蔵瓶に上げるようにした。同一バッチに別ロットのフライアッシュが混ざらない工夫をしている。

(2) 高炉スラグ微粉末に関するアンケート結果

アンケートでは先ず、回答の対象とした事例で用いた高炉スラグ微粉末の使用形態、種類について確認した。結果として、回答のあった15件の実績の中で、混和材として高炉スラグ微粉末を用いられたケースが6件、高炉セメントB種が用いられたケースが9件であった。高炉スラグ微粉末が使用される形態としては、混合セメントが使われることが多い結果となった。なお、高炉セメントA種、C種が用いられたケースは、今回得られた回答の中にはなかった。

1) 積雪寒冷地での使用実績について

【Q1-1】高炉スラグ微粉末(高炉セメント)を使用／研究することになった目的を可能な範囲で記載してください。

この設問では、記述式で回答を求めた。回答欄に示された記述を、それぞれ「発注者の指示・仕様書規定」「技術的な要求・地球環境に配慮」に分類して以下に示す。これらによると、高炉スラグ微粉末、あるいは高炉セメントを使用する場合は、発注者の指示や仕様書規定に基づいて決定される場合が多いことがわかる。一方、技術的な要求や地球環境に対する配慮から、温度ひび割れ制御対策、塩害対策として積極的に高炉スラグ微粉末、高炉セメントの使用を提案したケースもあった。

〔発注者の指示・仕様書規定〕

- ・ 仕様書指定：北海道開発局(農業)発注の工事において当初設計ではグリーン調達の観点からすべてのコンクリート構造物に高炉セメントが指定されていたが、設計変更協議により均しコンクリートのみの使用に限定した。躯体コンクリートは、高炉セメントによる自己収縮ひびわれを回避するため、普通セメントを使用。
- ・ 仕様書指定：高炉セメントB種の指定
- ・ 仕様書指定：設計計画の段階から高炉セメントの使用
- ・ 高速道路の壁高欄に使用、高速道路は凍結防止剤による塩化ナトリウム散布により塩害を受けやすい環境。発注者(ネクスコ)より指示があり使用した。
- ・ 試験練りを省略する目的で隣接工事の配合を使用したため。
- ・ 高速道路の壁高欄に使用、高速道路は凍結防止剤による塩化ナトリウム散布により塩害を受けやすい環境。発注者(ネクスコ)より指示があり使用した。
- ・ 仕様書指定：トンネル覆工コンクリート

〔技術的な要求・地球環境に配慮〕

- ・ マスコンクリートの温度ひび割れ対策として低発熱型特殊高炉セメントを使用した。
- ・ 塩害対策区分に該当する橋梁であり、長期耐久性の向上、環境負荷低減を目的に提案した。
- ・ 塩害対策区分に該当する橋梁であり、塩害・凍害に対する耐久性の向上、環境負荷低減(CO₂の排出量削減)を目的に提案した。
- ・ 流動性を期待した。

【Q1-2】積雪寒冷地で高炉スラグ微粉末(高炉セメント)を採用／研究対象とした場面はどこですか？

この設問に対しては、アンケートに示した選択肢から一つを選んでの回答である。その結果を図 3.2.23 に示す。

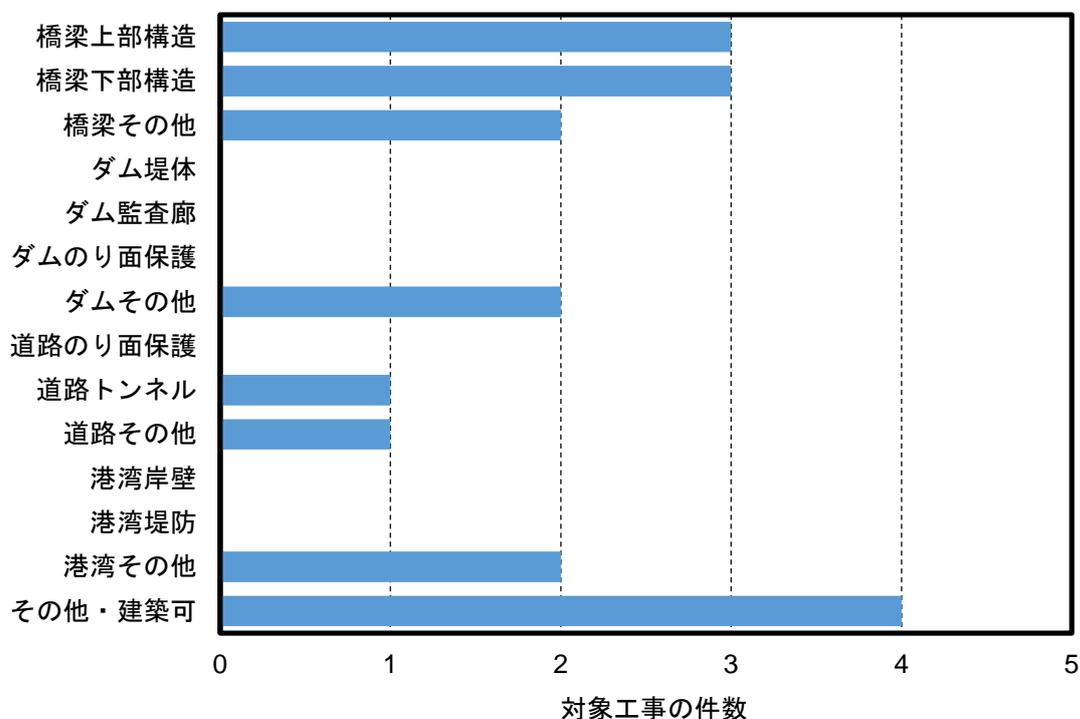


図 3.2.23 アンケート回答の対象工事の種別(回答 18 件)

アンケート回答の選択肢は、大きく橋梁、ダム、道路に分類して用意したが、フライアッシュの場合と異なり、橋梁において高炉スラグ微粉末あるいは高炉セメントの適用事例が多いことがわかる。橋梁の中でその他に属するのは壁高欄での使用事例である。橋梁の他では、頭首工本体および取水工・導水路、鉄道構造物(トンネルインバート)、フィルダム減勢工・洪水吐、プレキャストコンクリート、縁石基礎、護岸ブロックなどの使用事例が示された。

2) 材料品質について

【Q2-1】JIS で規格された高炉スラグ微粉末を使用／研究するにあたり、品質について考慮した項目は何ですか？

この設問に対しては、アンケートに示した選択肢からの回答である。ここでは複数回答を可としている。回答の内訳を図 3.2.24 に示す。その結果、高炉スラグ微粉末では「考慮していない」の回答が約半数(46.7%, 7 件)を占めた。これには、高炉スラグ微粉末の使用形態は高炉セメントである場合が多いことに加えて、その使用の動機の大半が発注者の指示・仕様書規定であり、回答者の側に選択権がないケースが多いことが要因になっていると思われる。

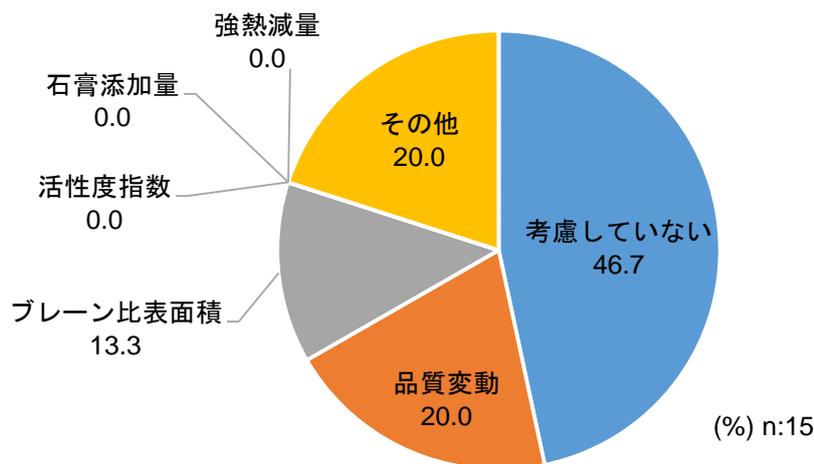


図 3.2.24 高炉スラグ微粉末の品質について考慮した事項

また、この設問では、「その他」の回答あるいは高炉セメントを用いたケースのために自由記述欄も設けている。自由記述欄に記載されていた内容は以下の通りである。

- ・ 河川工事であるため、出水期(8, 9月)を除いた工期設定であるため、通期施工となり、かつ気象条件が厳しい(夏期 30℃以上, 冬期 -10℃以下)ため、スランプ, 空気量, コンクリート温度を確認していた。
- ・ 高炉スラグ微粉末の使用実績が少なかったため, 所定の品質(特に流動性)を確保するために, 10 回程度試験練りを繰り返し, 配合を決定した。
- ・ 品質変動(強度)

3) 積雪寒冷地での配合について

【Q3-1】高炉スラグ微粉末(高炉セメント)の使用を設計／研究に取り入れた時、着目した項目は何ですか？

この設問に対しては、アンケートに示した選択肢からの回答である。ここでは複数回答を可としている。回答の内訳を図 3.2.25 に示す。ここでは、「特に着目していない」とする回答が最も多くなった。これは高炉スラグ微粉末に対するアンケートの回答 15 件のうち 9 件が高炉セメント B 種の実績であり、さらに多くが仕様書規定等による採用であることが要因と考えられる。次いで多かったのは「強度発現特性」であり、この背景には高炉セメント B 種の使用は既に既定路線であっても、施工者の立場としては施工サイクルを検討する上で初期強度発現特性の情報が必要と考えるためであろう。

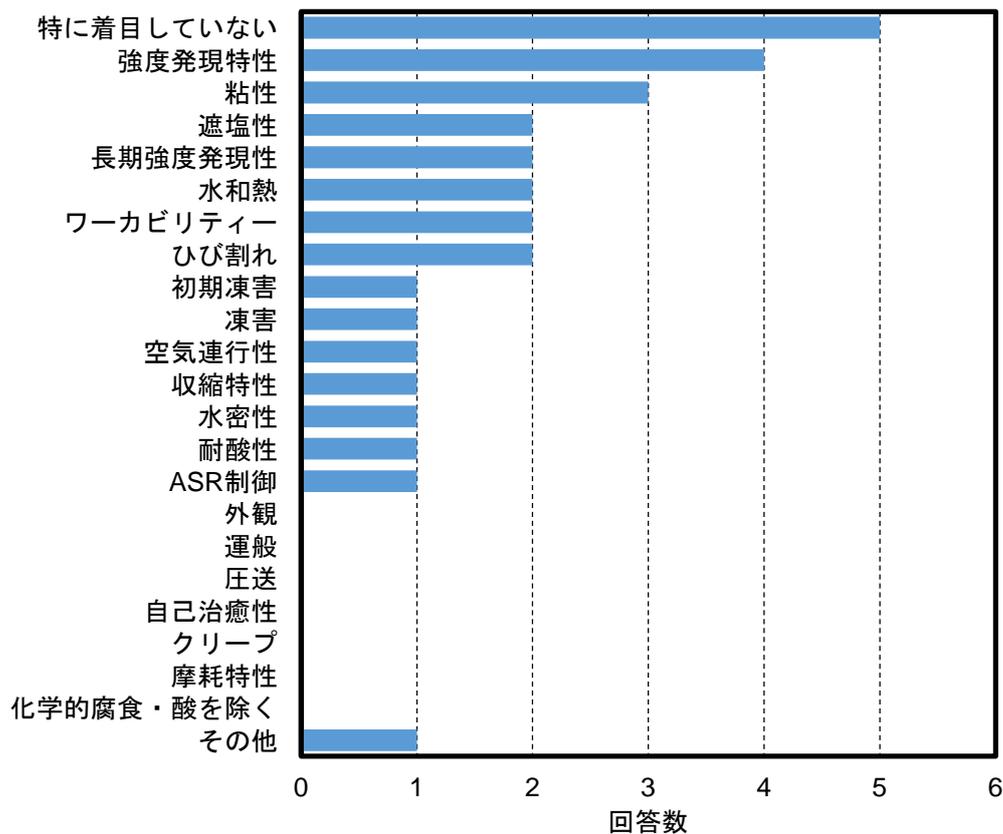


図 3.2.25 高炉スラグ微粉末の使用を検討した時に考慮した事項(回答 30 件)

また、この設問では「その他」の回答に対して自由記述欄を設けている。自由記述欄に記載されていた 1 件であり、内容は以下の通りである。

- ・ 躯体コンクリートは、高炉セメントによる自己収縮ひびわれを回避するため、普通セメントを使用。均しコンクリートのみグリーン調達の観点から高炉セメントを使用。

【Q3-2】最終の高炉スラグ微粉末(高炉セメント)を用いたコンクリートの製造場所、配合および養生方法を教えてください。

この設問では、コンクリートの配合計画・配合設計の考え方についていくつかの項目に分け、それぞれアンケートに示した選択肢から回答を求めている。

□コンクリートの製造場所

図 3.2.26 に、事例として取り上げた高炉スラグ微粉末(高炉セメント)を用いたコンクリートの製造場所に関する回答結果を示す。全 15 件の回答のうち、生コン工場との回答が 80%(12 件)と最も多く、次いで製品工場の 13.3%(2 件)となった。その他の 6.7%の回答は、研究レベルでの実験室での練混ぜである。

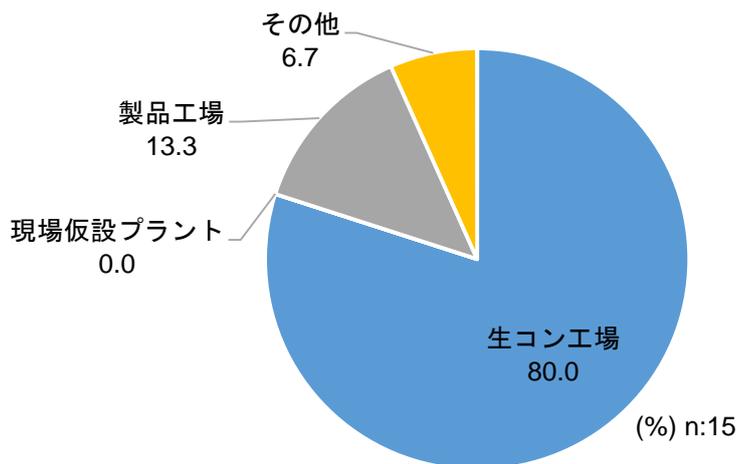


図 3.2.26 コンクリートの製造場所

□強度指定材齢と設計強度・呼び強度

図 3.2.27 に強度指定材齢(強度保証材齢)に関する回答結果を示す。回答には高炉セメント B 種によるレディーミクストコンクリートを用いた事例が多く含まれることから、ほとんどのケースで強度指定材齢を 28 日に設定している。91 日など長期に設定した事例はなかった。3 日～14 日の短期に強度指定材齢を設定したケースは、製品工場が 1 件、縁石基礎、護岸ブロックにコンクリート供給の事例を示したコンクリート工場が 1 件(複数回答)であった。

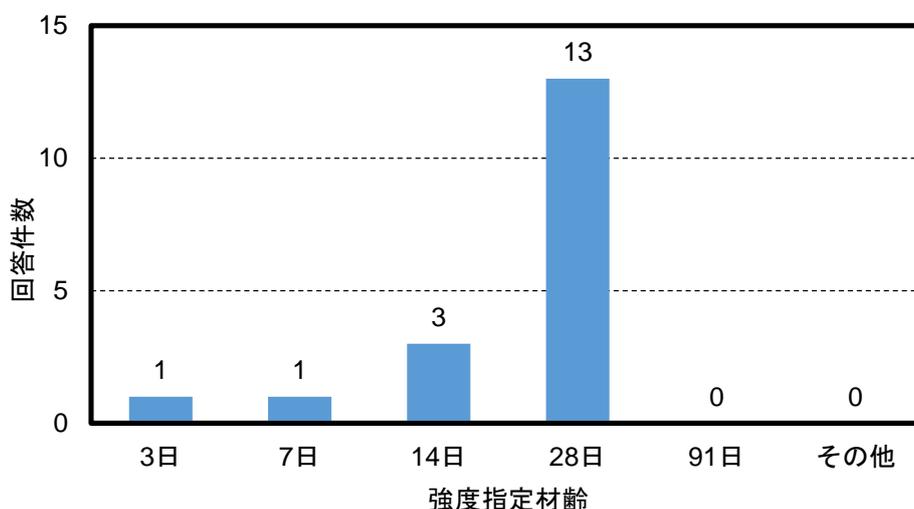


図 3.2.27 強度指定材齢の設定(回答 18 件)

回答があった事例の設計強度の分布を図 3.2.28 に、呼び強度の分布を図 3.2.29 に示す。図 3.2.28 の集計結果は、アンケート用紙に記載の設計強度の選択肢に誤りがあり、設計強度 24N/mm^2 および 40N/mm^2 が前後の強度範囲に重複した設問となっていたため、実際の回答件数は各強度範囲で多少増減すると思われる。一方の呼び強度では 24～27 のものが中心であるが、呼び強度 40 との回答が 2 件、50 との回答が 2 件あり、橋梁の上部工などでは比較的高強度のコンクリートにも高炉スラグ微粉末(高炉セメント)が適用されることが示された。

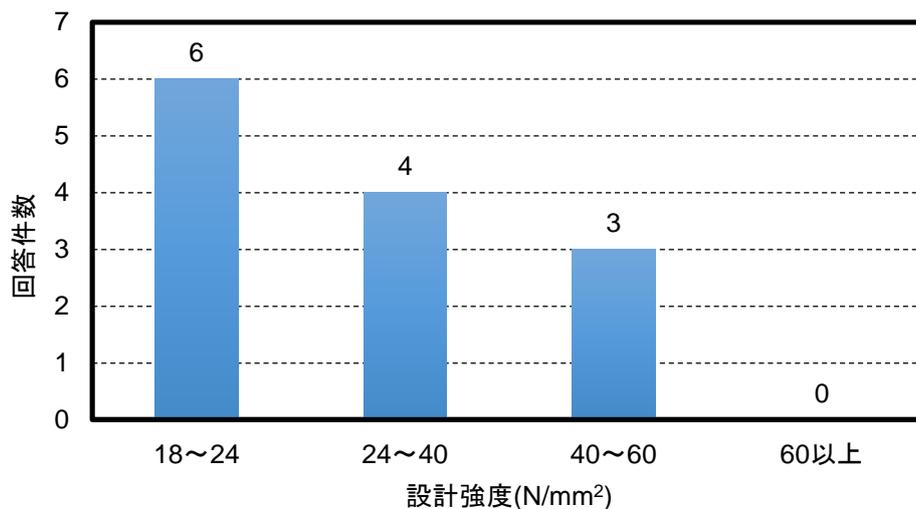


図 3.2.28 コンクリートの設計強度の分布(回答 13 件)

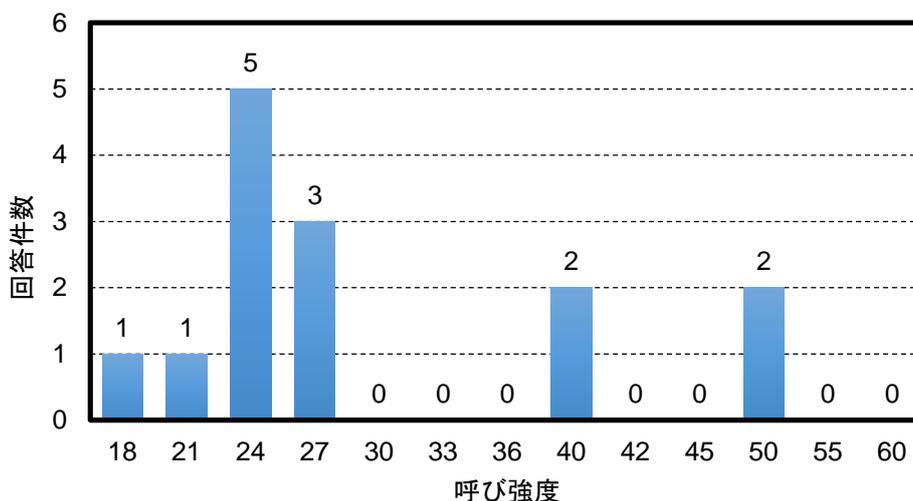


図 3.2.29 コンクリートの呼び強度の分布(回答 14 件)

□混和材としての高炉スラグの使用方法

図 3.2.30 に、混和材としての高炉スラグ微粉末の使用方法に関する回答結果を示す。回答のあった 70%(7 件)は高炉セメント B 種を回答している。高炉スラグ微粉末を混和材として用いたケースでは普通ポルトランドセメントとの組み合わせが 20%(2 件)であり、早強ポルトランドセメントと組み合わせたケースも 10%(1 件)あった。これら高炉スラグ微粉末を混和材として使用した合計 30%(3 件)の回答の内訳は、製品工場による回答で 6000 ブレーンの高炉スラグ微粉末と普通・早強ポルトランドセメント組み合わせた 2 件、4000 ブレーンの高炉スラグ微粉末と普通ポルトランドセメントの組み合わせによって、生コン工場でコンクリートを製造し、プレキャストコンクリートを施工した事例の回答が 1 件である。よって、今回のアンケートでは、高炉スラグ微粉末を混和材として用いているのはコンクリート製品、プレキャストコンクリートの製作の現場であり、それ以外の建設工事では高炉セメント B 種が用いられるに止まっていることが示された。

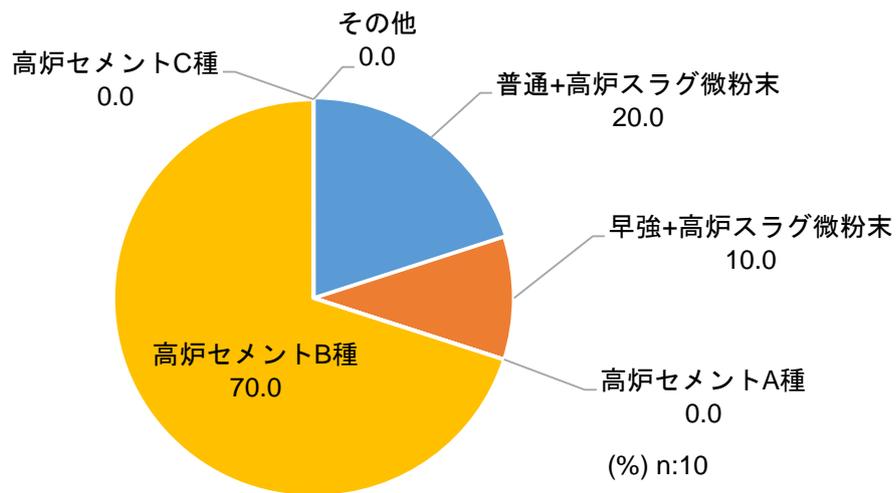


図 3.2.30 混和材としての高炉スラグ微粉末の使用方法

□高炉スラグ微粉末添加の考え方(高炉セメントは除く)

ここでは、配合計画時における高炉スラグ微粉末添加の考え方について、アンケートに示した選択肢の中から回答を求めた。結果を図 3.2.31、図 3.2.32、図 3.2.33 に示す。高炉スラグ微粉末を混和材として用いた事例のサンプル数が少ないこともあり、すべての事例で共通して、高炉スラグ微粉末の使用は、内割り置換、質量置換、高炉スラグ置換率 50%で行われていた。

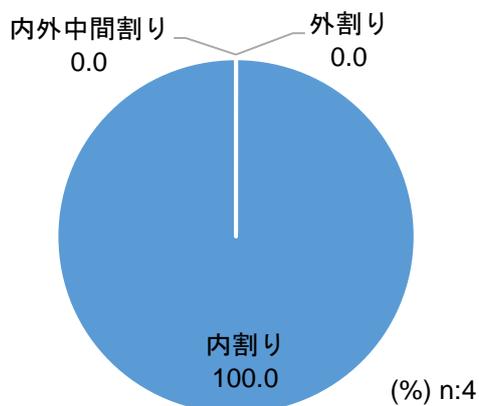


図 3.2.31 配合計画における高炉スラグ置換の考え方(1)

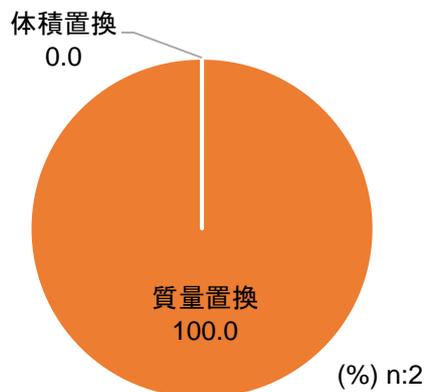


図 3.2.32 配合計画における高炉スラグ置換の考え方(2)

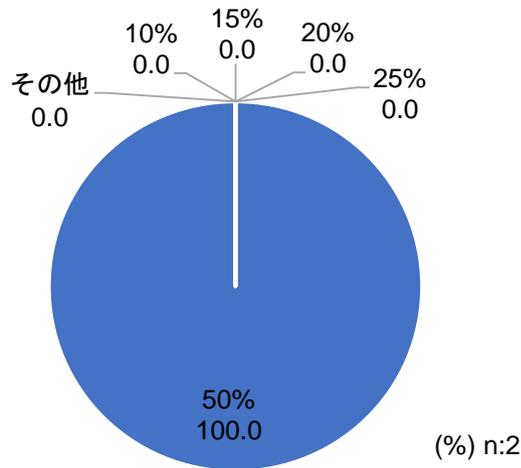


図 3.2.33 高炉スラグ置換率

□養生方法について

コンクリートの養生方法については、A 散水、B 湿布、C 封緘、D 養生剤(被膜剤)、E 給熱、F 断熱、G 標準、H 常圧蒸気、I その他の選択肢の中から複数選び、それらの組み合わせで、それぞれを何日実施したかという形で回答を求めた。回答された内容はそれぞれの事例でケースバイケースという状況であった。また、施工時期についても1月から12月までの選択肢を示し回答を求めたが、結果として回答されたのはコンクリート工の工期であったと思われ、アンケート結果から養生方法と施工時期の間に有意な関係を見出すまでには至らなかった。なお、本項目はフライアッシュに対する調査結果と同様の傾向であった。

4) 施工時・施工後の高炉スラグ微粉末(高炉セメント)を利用したコンクリートの状況について

【Q4-1】高炉スラグ微粉末(高炉セメント)を採用／研究した時、施工時やその後に何か副次的な成果としてのメリットがありましたか？

この設問に対しては、アンケートに示した選択肢からの回答である。ここでは複数回答を可としており、計画当初には期待していなかった効果、あるいは計画当初に期待した効果に加えて実際に高炉スラグ微粉末(高炉セメント)を使用してみて感じられた効果やメリットについての回答を求めた。回答の内訳を図 3.2.34 に示す。

結果は、「ない」の回答が7件と最も多くなった。次いで流動性改善、温度ひび割れ制御が3件となった。多く回答があった副次的な効果として流動性改善では、高炉スラグ微粉末を混和材として使用した事例を示したコンクリート工場が2件、生コン工場で高炉セメント B 種を用いたコンクリートを製造し、フィルダム減勢工・洪水吐などの施工に適用した事例の1件があった。

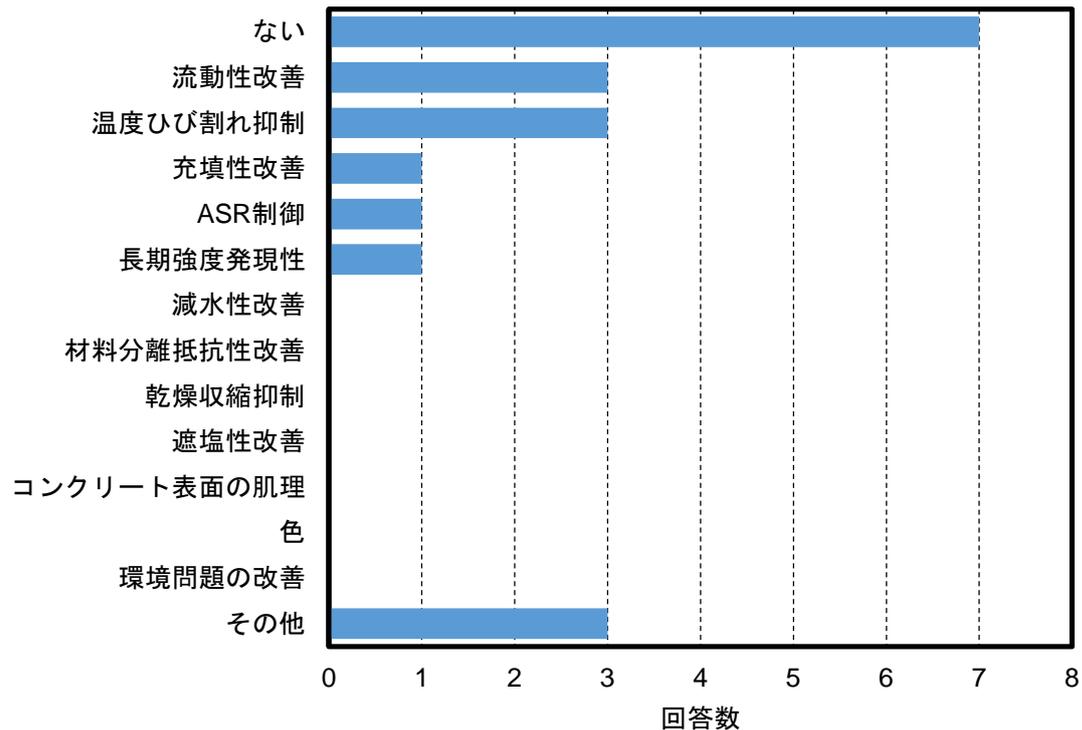


図 3.2.34 高炉スラグ微粉末利用による副次的な効果(回答 19 件)

また、この設問では「その他」の回答に対して自由記述欄を設けている。自由記述欄に記載されていた内容は以下の通りである。

- ・ グリーン調達としての計上のみ
- ・ 高さ 4.5m、体積約 2000m³ のフーチングコンクリート施工にあたり温度応力解析を行い、コンクリートは 3 回打設(高さ 1.5m 毎、中 3 日)で施行した。鉄筋計、有効応力計を埋設し計測した結果、水和熱によって発生する引張応力度は解析値より小さく、温度ひび割れは確認できなかった。
- ・ 他の混和材等の技術提案等による配合変更を考えると普通ポルトランドセメントの方が相性がよいため、使用しやすい。

【Q4-2】高炉スラグ微粉末(高炉セメント)を採用／研究した時、施工時やその後(経過観察)に問題や課題はありましたか？

この設問に対しては、アンケートに示した選択肢からの回答である。ここでは複数回答を可としている。回答の内訳を図 3.2.35 に示す。ここでも「ない」の回答が 8 件で大多数を占めた。これは混合セメントの代表としてこれまで高炉セメント B 種の採用が多く、その特性が周知されている結果かもしれない。

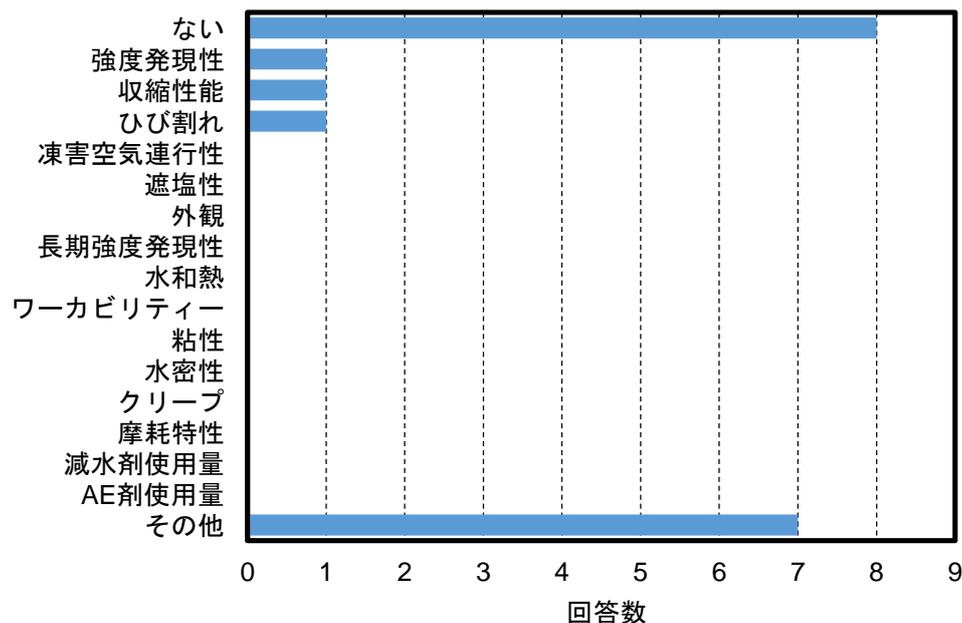


図 3.2.35 高炉スラグ微粉末の利用による問題や課題(回答 18 件)

また、この設問でも「その他」の回答に対して自由記述欄を設けている。自由記述欄に記載されていた内容は以下の通りである。

- ・ 過去に自己収縮に伴うクラックや亀甲ひびわれを経験。
- ・ 乾燥収縮によるひび割れが発生。
- ・ 強度発現が思った以上に早く、断熱温度上昇量も普通ポルトランドセメントと変わらない。マスコンクリートでのひび割れの発生が顕著であった。
- ・ 工場で専用サイロが必要になるので、サイロを確保する必要がある。
- ・ 養生管理が難しい。
- ・ 強度発現が遅く、トンネル覆工作业における施工サイクル確保のための単位セメント量の増量や混和剤を考慮する必要があるため、セメントの種類は目的構造物に合わせて選定し設計して頂きたい。

3.2.4 第2回アンケート集計結果の総括

フライアッシュ、高炉スラグ微粉末等の産業副産物起源のコンクリート用混和材は、寒冷時における初期強度発現特性に対する懸念、コンクリートの製造やデリバリーにおける制約により、有効利用が進みにくいのが現状である。しかし、コンサルティング、発注、設計、施工・維持管理を含めた総合的な工事計画を上手く立案することで産業副産物起源のコンクリート用混和材を使用したコンクリートの性能を十分に引き出すことができるということは共通して認識されていることがアンケートから示唆される。また、これまでの利用実績が少ないのは、「発注者の指示・仕様書規定」からくる特異な工事事例がほとんどであり、一般的な利用等で継続的に使用するような先行きが見えないことから製造者側の設備投資に係わる問題が起因している傾向が示された。

3.3 アンケート結果の分析と課題および今後の展望と提言

第1回ならびに、第2回アンケート結果について、各専門の立場より分析を行い、そこに見られる課題を整理した。また、考えられる今後の産業副産物利用促進に向けた展望と提言についても記載する。

3.3.1 材料供給者の立場から

(1) アンケート結果の分析・そこに見られる課題等

アンケートの結果を分析すると、フライアッシュはコンクリートの水密性の向上、温度ひび割れの抑制、流動性(自己充填性)・材料分離抵抗性の向上などの優れた点が認識されており、仕様書で多く指定されていることが確認できた。しかし、その一方で、低温環境下での凝結や強度発現の遅延、また、空気連行性の低下や変動の対策が必要になるなどの課題も指摘されている。このことから、これらに対応するための実用的な情報提供とともに、長所を活かしながら適材適所で使用を検討することが必要と考える。

高炉スラグ微粉末は、コンクリートの塩化物浸透抑制(塩害対策)や環境負荷低減などの優れた点が認識されており、仕様書でも多く指定されていることが確認できた。しかし、乾燥収縮や自己収縮によるひび割れなどの課題が指摘されている。このことから、フライアッシュと同様に、これらに対応するための実用的な情報の提供と、長所を活かした使用の検討が必要と考える。

また、産業副産物起源のコンクリート用混和材の使用においては、専用サイロを確保するなどの製造設備に関する課題も指摘されている。

(2) 産業副産物利用促進に向けた展望と提言

産業副産物起源のコンクリート用混和材(高炉スラグ微粉末、フライアッシュ)の普及を促進させるためには、発注仕様指定することや、これらを使用するコンクリート構造物に携わる者(設計者、施工者、ならびに製造者)へ、インセンティブが働く仕組みも効果的と考えられる。代表例としてグリーン調達制度を挙げると、混合セメントは特定品目に指定されているが、混和材は指定されていないなど、混和材利用を促進する仕組みは不足しているため、混合セメントと同等のインセンティブが働くようにすることが望まれる。

そのためには、混和材使用の有効性・必要性が良く認識されることが必要であり、コンクリートの利用条件や環境条件に応じて適材適所の利用ができるようなガイダンス等の整備が必要と考えられる。また、仕様書を混和材が利用しやすい内容(混和材使用時の水セメント比の水結合材比への読替え等)に見直すことも望まれる。

これら技術面、コスト面、JIS品を中心とした安定供給体制の確保などの課題を解決することで、普及の推進が期待される。しかし、産業副産物起源のコンクリート用混和材の利用が促進することは、その地域(都道府県単位)で発生した廃棄物を大量に活用して製造されるポルトランドセメントの生産量が減少することに繋がり、場合によっては廃棄物の受け入れ量が制限されることも考えられる。このことから、産業副産物起源のコンクリート用混和材の利用はポルトランドセメントの生産で活用される廃棄物量のバランスも考慮しながら推進する必要もあると考える。

3.3.2 製造者の立場から

(1) アンケート結果の分析・そこに見られる課題等

産業副産物を使用する主な起因としては、発注元(官庁、民間)が示す仕様書および特記仕様書、あるいは技術的側面、地域環境側面など様々な要因がある。仕様の詳細目的の多くは、例えばフライアッシュは高流動コンクリート等のセメント代替粉体や製品肌の改善を目的に使用されるとの回答が得られている。また、高炉スラグ微粉末や高炉セメントは塩害対策が多い。

この状況下で積雪寒冷地での耐久性(耐凍害性)を考慮すると、フレッシュコンクリートの空気量確保が重要なポイントとなる。例えばフライアッシュの使用では、通常製造されるコンクリートと比較すると所定の空気量を得るために AE 剤量が增大することもある(フライアッシュに含まれる未燃焼カーボンに AE 剤が吸着されるため過去の事例では通常時の3倍以上もある)。その結果、フライアッシュの品質やコンクリートの配合設計では、凍結融解抵抗性を意識し空気量管理を着目するアンケートの回答がある。また、ロット内での変動はさほど感じられないが、ロット変化による空気量の再調整の必要性が回答に見られた。このことから、AE 剤の種類によってもこの傾向が顕著化する既往研究報告もあるため、昔と比較するとロット内での品質変動が少なくなっているが、空気量管理は注意する項目から外せられない。同様に、高炉セメントや高炉スラグ微粉末の使用によりフレッシュコンクリートの経時変化での空気量低下が大きくなる事例もあるため、高炉セメントや高炉スラグ微粉末の使用においても空気量管理は注意する項目から外せられない課題である。

また、工場では通常使用している材料以外のコンクリート用混和材(産業副産物等)を用いて製造する場合、製造設備の問題が有り、仮に小型の試験練りミキサー等で配合を作り上げても、実際の製造では材料の貯蔵・計量設備に制約が生じることがある。計量装置の最大秤量に対し使用量の少ない産業副産物起源の混和材を使用する場合に、計量誤差が生ずる可能性も考えられ、強度などの要求性能に影響する場合もある。

このことから、少量貯蔵でかつ高精度な計量設備がないことから、代替策として 1m^3 あたり総粉体量の 15% を産業副産物起源の混和材に置き換えてフライアッシュセメントとして納入することもある。同様に、高炉スラグ微粉末の使用実績より、高炉セメントの使用実績が多いのもその理由でもあるが、必ず貯蔵設備の使用制限が課題となり得る。

この他に、レディーミクストコンクリートやプレキャスト製品は日本工業規格(JIS)の品質要求を満足できることを証明するため、通常使用されている材料はもとより配合に関しても標準化作業を行い、JIS 認証を受けてはじめて JIS 認定製品として製造・出荷される。つまり、産業副産物起源のコンクリート用混和材が日本工業規格品であっても、標準的に使用する材料として JIS 認証されていない場合は、寸法・強度等が満足していても、JIS 認定製品として出荷することができない。このことに関して発注者側や施工者側の周知ならびに理解も重要な課題となる。

(2) 産業副産物利用促進に向けた展望と提言

フライアッシュはワーカビリティや砂代替による製品肌の改善効果があり、石粉由来の粉体利用より将来の強度発現や耐久性の改善が期待できる。しかし、これを使用したプレキャスト製品は、出荷材齢ならびに管理材齢が 14 日であり、この範囲ではフライアッシュがポズラン反応し、強度発現性に寄与することは考えられない。よって、水結合材比の設計ではなく、水セメント比

の設計になる。当然、現場使用時にポズラン反応し、強度発現性や耐久性を改善することが見込まれるが、これらの効果は使用環境に差があり、現段階では改善効果を設計に見積もることができない。今後の研究や調査より設計手法が変わることを望む。

また、高炉スラグ微粉末や高炉セメントは遮塩性に期待ができる。しかし、これを使用したプレキャスト製品は、管理材齢 14 日では強度発現性の影響は少ないが、配合によっては脱型強度に大きく影響し、強度が得られないため、製造工程の負担になる。解決策があるもの、温度ひび割れの発生や自己収縮に伴うひび割れの発生原因に繋がるため、場所打ちコンクリートの養生日数指定のように、プレキャスト製品製造に対しても養生規定の整備は必要かもしれない。

耐久性に関してはレディーミクストコンクリートならびにプレキャスト製品ともに空気量管理に課題がある。しかし、フライアッシュを利用したコンクリートの空気量の保持性改善では、未燃焼カーボンによる AE 剤吸着を抑える専用の AE 剤がある。また、高炉スラグ微粉末や高炉セメントを使用したコンクリートにおいても AE 剤の主剤の違いによって空気量の保持性は変わる。このように、技術的な解決策はあるため、これらの知見の普及が望まれる。

現時点では技術的に産業副産物起源のコンクリート用混和材の特徴を理解し、利用することは可能と思われるが、実情の製造ではそれらを実現するために製造設備の改善や変更が必要不可欠であり設備投資が伴う。過去に産業副産物の積極的利用促進でグリーン購入法が施行された時は、日本工業規格(JIS)を満足しているレディーミクストコンクリート製造会社の多くで、高炉セメント B 種を使用した配合を設備投資するなどし、標準化したため、高炉セメント B 種の使用量が大幅に増加した。しかし、継続性がなく現在は沈静化し、利用状況が少ない経緯がある。つまり、発注側(官庁及び民間)からの全面的な推し進めと継続がなければ、企業は設備投資の費用が先行するため、費用対効果を考慮すると投資に踏み切れない。また、設備投資を行った場合、製造価格に設備の償却コストや維持管理コストの上乗せが発生し、コストメリットは見込まれない可能性がある。

昨今では産業副産物起源のコンクリート用混和材の品質やコンクリート混和剤の効果が向上していることを考慮すると、JIS 規格の厳密な別計量する意味合いが不明瞭となる。例えば、産業副産物起源のコンクリート用混和材の利用目的や期待する効果別に計量の位置付けを明確にし、フライアッシュによる肌面の改質のように、強度や耐久性等の要求性能から逸脱しない場合には累加計量を可能にする基準や指針類等の整備が進めば、設備投資の負担が減ることも考えられる。

以上のことから、産業副産物起源のコンクリート用混和材の積極的な利用促進と、それを維持するシステムの構築、さらに、使用時の経時的な空気量低下や、それを考慮した設計空気量の設定方法等の特性を考慮した基準や指針類の整備が環境循環型社会を形成することとなり、それを高く望む。

3.3.3 施工者の立場から

(1) アンケート結果の分析・そこに見られる課題等

アンケートの回答結果は、フライアッシュまたは高炉セメントに対する回答が多くを占め、フライアッシュセメントや高炉スラグ微粉末の回答は少なかった。フライアッシュのアンケート結果を見ると、フライアッシュを利用した理由は大きく 2 つに分けることができる。一つは、ダム、トンネルの吹付け、発電所といった大型あるいはセメント使用量が多い構造物を対象とした発注

者の仕様・要望である。もう一つは高耐久化や材料分離抵抗性の改善、高流動コンクリートとしての利用、マスコンクリートの発熱抑制対策、ポゾラン反応による長期強度改善など、技術的側面からの利用であった。両者ともに利用理由全体の4割程度を占めた。また、高炉スラグ微粉末のアンケート結果でも利用した理由はやはり発注時の仕様規定が最も多く全体の6割程度を占め、次いで塩害対策(高耐久化)や橋梁下部工のマスコンクリートにおける温度ひび割れ対策などの技術的側面からの利用が全体の3割程度に留まった。このことから、産業副産物起源のコンクリート用混和材(フライアッシュと高炉スラグ微粉末・高炉セメント)を使用する場合の多くは、仕様書や発注者の指示であることがわかった。

利用促進の課題としては、専用サイロが必要になるなど設備制約を受けることである。道内では、混合セメント・コンクリート(特にフライアッシュコンクリート)を提供できるプラントが地域により偏在しているため、対応が難しい地域もある。この他に空気量管理、試験練り回数の増加、収縮ひび割れの発生、ならびに初期強度発現性等の品質管理の難しさが挙げられた。ただし、事前の試験および現場養生供試体などにより、初期強度発現が遅いことを把握した上で対応可能と考えるが、普通セメントに比べて養生日数が増加するため、給熱保温養生が必要となる冬期施工時の利用は、コストが増大してしまう。

しかし、そのような中でも高炉セメントB種は、土木工事において標準的に使用されていることや混合セメントとして仕様指定されているため、使用量も多く、特に大きな問題や課題はないように感じられている。一方で、フライアッシュは多くの課題が挙げられている。特にフライアッシュの空気量管理は、フライアッシュに含まれる未燃焼カーボンの量等が主原因であり、その量はフライアッシュが産業副産物として生じる過程において、石炭ボイラーで使用する石炭の産地や燃焼技術の影響を受けるため品質が安定しないことに由来する。そこで、フライアッシュのロット毎に試験練りを行い、AE剤の量を決定すれば規定量の空気量に関して解決できると考えられるが、硬化の過程で空気量が減少することまでは管理しづらい。施工現場では、荷卸し時のフレッシュ性状を確認してコンクリートを受け入れるため、その時の空気量の安定はもちろんのこと、硬化の過程での空気量確保が大きな課題と考えられる。

このように使用においてはポゾラン反応による長期の性能向上等に期待できるが、施工ではそれを可能にする品質管理の難しさや工程が伸びる等の二律背反を解決することが課題となる。

(2) 産業副産物利用促進に向けた展望と提言

産業副産物起源のコンクリート用混和材の利用を促進するには、明瞭な目的、つまり、環境負荷低減や社会資本の長寿命化を示す必要があると思われる。近年は地球温暖化が国際的な社会問題となり、また我が国では少子高齢化や財源不足により公共事業費の削減が進む中で、『環境負荷低減』と、『高耐久性による構造物の長寿命化』を前面に押し出した仕様規定に変えていくことが、責務になりつつある。

そのような状況下で、高炉セメントの普及は少しずつ進んでいるが、高炉スラグ微粉末については、品質管理の手間や設備の問題により、普及が進まないのが現状である。

一方でフライアッシュやフライアッシュセメントに関しては、凍結防止剤の散布など厳しい塩分環境下における塩害やASR等による劣化要因に対して高耐久化対策として有効であることが検証されている。また、セメント代替粉体として使用することで、セメント使用量の減少による

CO₂の排出削減や、産業副産物の有効利用として期待されている。その他にも配合によってはコンクリートの充填性が良く作業効率が向上し、打設工程の短縮が図れる等の利点はある。

発注者においても普通コンクリートと比較して総合的な経済性が優位であり、これら混和材を利用する有効性を認識しつつあるが、実際に採用となると、使用実績が少ない材料ではリスクの洗い出し(空気量管理や方法等)を含めた試験練り等を行い、産業副産物起源のコンクリート用混和材が持つ本来の性能を有効に引き出せることを示す必要があるため、仕様書指定外の場合、変更にかかる施工者側の労力が大きくなる。企業はリスクを回避する傾向にあるため、結果として、普及が進まないと考えられる。

それらを払拭させるために、産業廃棄物起源の混和材を利用しやすい仕組みや仕様書を早急に整備し、利用を促進する必要がある。先行している他県の仕様書等を参考にし、施工時期を限定するなどした寒冷地(北海道)におけるフライアッシュコンクリートの標準仕様化への取り組みが必要と思われる。場合によっては、空気量の設定や締固め方法などの細かな点や、対象とする構造物や設計強度、配合方法などを限定することも必要と思われる。

しかしながら、産業副産物を利用する場合、普通コンクリートに比べて初期コストが増加する傾向にあるため、その費用負担を誰が担うのが最も大きな課題である。現状では産業副産物を利用する場合、プラントにおけるサイロ等の投資やフレッシュ性状を管理するための人員の増員などから製造単価の増加は否めない。また、現状では産業副産物を利用した場合、設備制約を受け、試験練りや配合計画、品質試験などの品質管理に苦勞するなど、施工者側の負担が大きいことも普及促進の弊害要因としてあげられる。それらの緩和策として産業副産物を利用した場合に、環境負荷低減に寄与したとして国からの補助金の受給や、工事評価点で大きな加点を付けることによる、その後の受注機会拡大等、投資の償却やコンクリート価格の増加抑制に繋がる何らかの仕組み作りが望まれる。

このような取り組みを積極的に行い、少しずつでも産業副産物の利用を増やしていくことで、技術の発展と共に『設備制約』や『高い製造単価』も緩和され、産業副産物の更なる普及促進に繋がっていくものと思われる。

3.3.4 設計者の立場から

1) アンケート結果の分析・そこに見られる課題等

当委員会で実施した「産業副産物起源のコンクリート用混和材に関するアンケート」の結果、それらを使用する、あるいは研究することになった目的は、仕様書による規定および発注者からの要望が大半である。

発注者から土木構造物等の設計を委託され、各発注機関の設計仕様書や設計要領を遵守して設計成果品を提供する建設コンサルタント業務では、設計段階で指定された材料以外を提案するケースは少なく、一般的に普通ポルトランドセメントや混合セメント(特に高炉セメント)を規定するだけで産業副産物起源のセメントや混和材を提案するケースは少ない。

その他のセメントとして、まれに施工時の温度ひび割れ対策として低発熱型セメントの採用を検討するが、事業者の設計要領においてフライアッシュセメントは示されていない場合が多く、設計段階でフライアッシュセメントを選択することはほぼないと思われる。

例えば、北海道内の道路事業におけるコンクリート構造物設計に必要なコンクリートの材料条件は設計基準強度であり、設計計算では部材毎に使用するコンクリートの設計基準強度を決定する。

事業者が定めている「コンクリート構造物の設計要領」では、必要な設計基準強度および適用する構造物の種類毎のコンクリートの品質条件が規定されており、コンクリート構造物の図面や数量調書を作成する際に、部材毎の品質条件を記載することになっている。このコンクリートの品質条件は、適用する構造物や環境条件に応じて代表的な品質条件項目のパラメータが示されており、そのパラメータの組み合わせ毎に品質記号(RC-1S など)が一覧で示されている。代表的な品質条件項目とは、設計基準強度、スランプ、空気量、粗骨材最大寸法、最小単位セメント量であり、セメントの種類は特に示されていない。セメントの種類は、橋梁上部工(PC 桁)などでは早期に硬化すること、打ち上がったコンクリート表面の見栄えが要求されることなどからポルトランドセメント(早強)を一般的に使用している。混合セメント(殆どが高炉セメント)は橋梁下部工や擁壁などで、資源の有効活用の観点から使用する場合が多い。

発注者からのフライアッシュセメントの使用要請がないのは、設計要領、共通仕様書、歩掛りなどの材料に関する基準類に規定されていないためと考えられる。しかし、基準類に記載されていない技術が活用されていないわけではなく、NETIS に登録されている新工法や新技術の採用は設計段階でも施工段階でも積極的に活用を検討されている。また、土木構造物の設計法は、許容応力度法から限界状態設計法へと改訂され、さらに近年は性能照査型に移行してきており、道路橋示方書および鉄道構造物設計標準においても、設計の基本理念(道路橋)、あるいは設計の基本(鉄道構造物)として、安全性に加えて耐久性、施工品質の確保、維持管理の容易さ、さらに環境の調和にも留意することが記されている。また、要求事項を満足する範囲で従来の規程によらない材料の採用も可能となりつつある。

委員会で実施したアンケートでも、事例は少ないながらもフライアッシュあるいは高炉スラグ微粉末の使用の目的として、発注者からの要請、耐久性向上(水密性向上、温度ひび割れ抑制、流動性向上、ASR 対策、ワーカビリティ確保の課題解決方法)、環境対策(CO₂削減、資源有効利用)等という技術的判断によるものも見られた。しかし、デメリットとして、工程長期化や耐凍害性の低下に関するものが多い。施工工程について、養生手間の増加による工期と工費への影響や、強度発現遅延による工程長期化の懸念があるため、設計時に想定する工程計画の精度が低下することが挙げられる。長期化はやむを得ないものとしても、精度よく工事工程を算定する必要がある。よって、構造細目を検討し、決定する場合には、詳細な設計条件(定数など具体的なパラメータ)が必要となり、現在使用している土木学会コンクリート標準示方書に示されているものでは条件や情報が少ない。

以上のように、これまでの建設コンサルタントの業務では設計作業で安全性および経済性に重点を置かれることが多いが、今後は耐久性、施工性さらには環境に配慮した成果品を提供することが望まれる。また、発注形態が設計業務と工事に分割されており、設計、施工および維持に跨るフライアッシュセメントの適用効果に関する情報の蓄積がないため、材料を提案したとしても有効性を次に活かすシステムになっていないことも課題である。それには、率先して大学、各研究機関等から発せられる最新の情報を収集し、そして実際の業務への適合性を十分吟味して、各発注機関へ提案し、同意を得て最適な成果品を提供することが肝要であると考えられる。

2) 産業副産物利用促進に向けた展望と提言

現状で仮に設計段階で産業副産物起源のコンクリート用混和材を使用することになった場合、品質に対して考慮すべき項目と設計で想定したコンクリートの性能を発揮するために必要な各項目の目標値などを「施工者への申し送り事項」として設計成果に記載することが必須と考えられる。また、施工計画では施工工程を積算する必要がある。

これにはコンクリート用混和材の供給元、供給時期(施工時期)、供給される材料特性などが不明であるという課題がある。品質に対して考慮すべき項目と設計などでは温度ひび割れ解析(断熱温度上昇曲線)や材料劣化(塩化物イオンの拡散係数など)による品質低下の検討などを実施する場合があるので、その検討に必要な設計条件(定数など具体的なパラメータ)が整理されることが望ましい。また、施工計画においてはコンクリート用混和材として用いた場合、工期の長期化が懸念される。したがって、フライアッシュセメントの使用を検討する場合は、養生手間の増加や強度発現の遅延を考慮した施工検討が必要となる。これを考慮した施工工程の積算を精度よく実施するために、使用した場合に必要なコンクリートの打設スケジュールに関する情報を整備することが望ましい。

したがって、設計や工事発注時に使用される産業副産物起源のコンクリート用混和材の使用に関する強度性能、耐久性、必要な養生期間などの性能を確保するために必要な「品質確保のため考慮すべき目標値」、さらには施工、維持管理などが設計基準類に規定化されれば、有効性が認知され、使用実績が増加すると思われる。さらに、今後は生産性の向上や環境負荷低減に対して有効な技術や材料は積極的に活用されると考えられるため、産業副産物起源のコンクリート用混和材の使用効果を示すことが可能であれば、さらに使用の拡大が期待できると考えられる。

つまり、設計・施工・維持管理を一体とした発注形態に変化させながら、各発注機関が施工事例を積極的に公開し、また、同時並行で追跡調査や暴露試験等の施工情報の蓄積が必要と思われる。また、その情報より利用のメリット(環境負荷の低減、施工性の改善、耐久性の向上、経済性等)および利用の留意点等を学協会、大学および各研究機関において分析し、講習会等で解説することで理解を広めていくことも産業廃棄物起源のコンクリート用混和材の利用促進には必要と思われる。

3.3.5 発注者の立場から

1) アンケート結果の分析・そこに見られる課題等

フライアッシュや高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートの利点、欠点等はアンケート回答者には十分に認識されているようにうかがえる。利点としては、温度ひび割れ対策、施工性の向上、長期耐久性の向上、環境負荷低減、資源の有効利用等である。欠点としては、初期強度発現の遅れ、中性化深さ増大等が挙げられる。

マスコンクリート対策として規模の大きなコンクリート構造物に対しては、十分メリットがあると認識されつつあるものの、施工工程が長期化することが懸念される。特に、PC構造においては、型枠、鉄筋・PC鋼線配置、コンクリート打設、脱枠、PC緊張とサイクリックに施工するため、初期強度発現が遅いことにより工程遅延、仮設費等の工費増となる恐れがある。また、フライアッシュについては、過去の品質変動が大きかった経緯がある。

このように、フライアッシュや高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートにメリットがあるもののデメリットもあり、採用にあたっては、目的や現場条件に合わせて技術的に判断し、説明する能力が発注者・受注者の双方に必要となる。

また、多くのコンクリート工事がある中、一部の工事でフライアッシュや高炉スラグ微粉末を使用することは、プラント側でのストックヤード、サイロ等の設備が課題となる。

2) 産業副産物利用促進に向けた展望と提言

工程の遅延等のデメリットがあるものの、温度ひび割れ対策、遮塩効果、施工性向上等からそのメリットを活かした構造物への採用は積極的に行うべきと考える。例えばフーチングのようなマスコンクリート、従来方法では施工性が悪く品質確保が難しいトンネル覆工コンクリート、凍結防止剤(塩化ナトリウム)散布による塩害劣化環境の厳しい壁高欄等では、フライアッシュや高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートのメリットが発揮できるものとする。

現時点では、フライアッシュや高炉スラグ微粉末を混和材として用いる配合を、標準として広範囲に採用することは難しいと考えるが、発注者と受注者の双方が混和材としての特長を共通認識した上で適材適所で実績を重ねていくことにより、材料の改良も進んで適用範囲が広がっていくことが期待される。発注機関毎の仕様書等で採用できる範囲があるが、循環型社会システムの構築、地球環境負荷の低減、構造物の品質耐久性確保、資源のリサイクル等の観点や施工性を確保するためのスランプの標準値変更、プラントの更新時の設備投資等を契機に、適材適所で活用を増やしていく上では、発注機関毎に取り組みだけではなく、産学官の連携が必要である。品確法の趣旨も踏まえ、構造物の品質確保・耐久性向上、現場作業員の労働環境改善(休日の確保)、十分に工期を確保した工事発注等、公共事業全体を考えた取り組みを進める中で、構造物・部材毎の課題に対応する形でのフライアッシュや高炉スラグ微粉末の効果的な利用を促進していくことが必要と考える。

3.3.6 研究者の立場から

1) アンケート結果の分析・そこに見られる課題等

フライアッシュを使用した目的や副次的な成果として、品質面から、フレッシュ性状の改善(特に流動性、材料分離抵抗性など)、構造物の耐久性の向上やマスコンクリート構造物の水和熱の低減(温度ひび割れ制御効果)、および、長期強度発現性において高い評価が得られている。一方で、耐久性(遮塩性、ASR抑制など)の側面からフライアッシュの効果を評価する回答は比較的少ない。道内にはASRを含む複合劣化を引き起こす反応性骨材が広く分布しているとの報告があり、今後の骨材供給事情を考えればASRに対する予防的対策が望まれる。また、フライアッシュのASR抑制に対する効果については、高炉スラグ微粉末よりも高い効果が得られるとの報告もあり、ASR抑制対策としてフライアッシュを使用する付加価値が期待できる。

しかしながら、利用が進まない背景の一つに発注者側での積極的な取り組みがないことが挙げられる。また、ユーザー側として、製造者の立場からは、空気量を制御する難しさなどの品質変動を懸念する意見が多い。このことから、「凍害」「空気連行性」「AE剤使用量」を指摘する回答が比較的多い。この点は従来から指摘されており、AE剤がフライアッシュ中の未燃焼カーボンに吸着されるため、エントレインドエアの発生が抑制されることの問題に起因する。この点は、AE

剤の種類(特にその主成分)に依存してエントレインドエアの安定性が低下する場合もあることから、フライアッシュとの相性の良い AE 剤を選定すること、耐凍害性に関しては硬化後の空気量にも依存することから練上がり直後の空気量を増量するなど良質な空気量を適量連行することで十分な耐凍害性を確保できると考えられる。一方で施工者の立場からは、強度発現の遅さを懸念する声が多い。しかし、施工工程や工期が制約条件とならないような工事では、強度指定材齢を 91 日にするなど、緩慢かつ長期的な強度発現を念頭に置いた合理的な設定を実施している。つまり、強度発現の遅さが懸念されるのは、施工工程や工期が制約条件となる工事であり、場合によっては材齢 7 日程度までの初期強度発現が要求される。特に、寒冷時における初期強度発現の遅さが懸念されているが、数値で示し解決する研究やその知見の周知が課題となる。

高炉スラグ微粉末(特に高炉セメントとして)は、発注者側の仕様書指定などが進んでいることから、多方面での実績がある。高炉セメントの使用において着目する点や成果については、フライアッシュの場合と類似した傾向にある。しかしながら、自己収縮、乾燥収縮に伴うひび割れや温度ひび割れの発生を指摘する回答が多い。高炉スラグ微粉末は、一般に強度発現が遅れる傾向にあり、水和熱を抑制できる点でマスコンクリートに適すと考えられていたが、高炉スラグ微粉末は比表面積が水和に影響し、大きいものは反応性が高まるため、早期の強度発現が期待できる。しかし、自己収縮が大きくなることや、マスコンクリートに使用した場合、早期の発熱がひび割れの要因になりやすいため、この場合は比表面積は小さいものの使用が適する。このような点に留意すれば、高炉スラグ微粉末はコンクリートの品質面において ASR 抑制や耐化学薬品性、耐遮塩性など耐久性に大きく寄与することから、フライアッシュとともに更なる積極利用が期待される。

この他に、曝露実験からポズラン反応が期待できる産業副産物起源のコンクリート用混和材を使用したコンクリートが実環境下にてスケーリングが多くなるなどの報告もある。しかし、これは養生期間が短く強度が十分に発現しない段階で凍結融解作用を受けたことが要因と考えられ、凍害を受ける時期での施工には養生に留意する必要がある。このことから、初期の十分な養生期間の設定と実施とともに適切な空気量を確保しておけば、長期的にはポズラン効果も発揮され、普通コンクリートと同等以上の耐凍害性も期待できると考えられる。

2) 産業副産物利用促進に向けた展望と提言

アンケート結果よりフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末のコンクリート用混和材としての効果やコンクリートの品質面での評価から一定の利用価値があることがうかがえるが、耐久性向上を評価する回答は比較的少ない。また、混和材を使用すると、一般に強度発現が遅れるため、適切な養生方法でかつ十分な養生期間をとる必要があり、結果、施工コストを高める要因に繋がる課題があった。

しかし、例えば、フライアッシュコンクリートの強度発現特性は、フライアッシュの品質変動の影響を除けば、主として①フライアッシュ置換率、②コンクリート温度、③水結合材比、に支配されると考えてよい。セメントの水和反応には、強い温度依存性があり、土木学会・コンクリート標準示方書・設計編では、これを式(1)に示す有効材齢によって評価している。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T/T_0} \right] \quad (1)$$

フライアッシュのポゾラン反応にも同様に温度依存性があり、フライアッシュコンクリートの強度発現は、これらが密接に関係している。フライアッシュコンクリートの強度発現を、フライアッシュ置換率と温度依存性を考慮して完全に定量化できれば、予想されるコンクリート温度などの施工条件の情報を与えることにより、初期強度発現の遅れを数値で示すことができるようになる。

一方で、初期強度発現の遅れや着目する材齢における強度低下は、わずかな水結合材比の調整で補償することが可能である。フライアッシュコンクリートの強度発現の温度依存性を定量化し、正確な強度発現の遅れ、強度低下の予測結果から水結合材比の調整量を提案できる技術の開発がなされれば、「初期強度発現の遅さに対する懸念」を払拭することができ、フライアッシュがより使いやすいものになると思われる。

この技術開発へのアプローチとしては、式(1)の有効材齢による方法でもある程度は可能であるが、フライアッシュコンクリートの強度発現の温度依存性をよい精度で定量化するためには、アレニウスの反応速度則に基づいたデータ処理が適している。

コンクリートの強度発現は、コンクリート中を通る超音波の伝播時間の変化から求めた超音波速度の変化で計測することができる。コンクリートの強度発現速度(強度発現曲線の微分)を、超音波速度変化率(dv_p/dt : 超音波速度変化曲線の微分)で表し、アレニウスの反応速度則基本式の両辺の対数をとると式(2)のようになる。

$$\ln\left(\frac{dv_p}{dt}\right) = \ln\left(\frac{dv_p}{dt}(T_s, v_p)\right) - \frac{E(v_p)}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s}\right) \quad (2)$$

式(2)は、直線の式、アレニウスプロットであり、 T_s は基準温度(20°C)、 $-E(v_p)/R$ はアレニウスプロットの傾き(活性化エネルギー)、 $dv_p/dt(T_s, v_p)$ は基準超音波速度変化率である。フライアッシュ置換率別に、3段階以上の温度水準で超音波速度による強度発現試験を行えば、式(2)によってアレニウスプロットを作成し、活性化エネルギーと基準超音波速度を超音波速度 v_p の関数としてモデル化できる。式(1)の有効材齢は、活性化エネルギーを超音波速度 v_p の関数ではなく、一定値(-4000)とした場合に相当する。この活性化エネルギーと基準超音波速度を用いれば、フライアッシュコンクリートの強度発現は温度依存性を完全に考慮して予測することができ、強度補償のための水結合材比のコントロール手法を提案できるようになる。

このように、強度発現を考慮した配合手法のもとで適切な初期養生を行えば、緻密な組織の形成を促し、長期材齢における強度増進とともに、耐遮塩性や耐凍害性、耐化学薬品抵抗性、耐海水性などの耐久性向上に繋がる。加えて、ASR抑制対策にも有効である。特に厳しい気象作用を受ける積雪寒冷地では、コンクリート構造物の耐久性を長期にわたり確保することがライフサイクルコスト縮減の観点からも極めて重要な課題であり、その対策の一つとして混和材の果たす役割は大きい。このことを業界全体で共有するため、産業副産物起源のコンクリート用混和材を用いたコンクリートの耐久性に関する最新の知見や各種の耐久性を得るために養生方法を含めた製造施工段階で留意すべき点を整理し、正しい理解を進める粘り強い取り組みが必要と考えられる。

この他に、産業副産物の利用促進を妨げる課題には、生コン工場等におけるサイロや計量器といった設備上の問題がある。今後もコンクリートの出荷量が減少傾向にある状況において、新たな設備投資は難しい。したがって、設備投資に見合う需要が見込めるだけの安定した出荷量が確

保されなければならない。また、低炭素社会の実現に向けて環境負荷低減に対する更なる意識の向上が必要と考えられる。

今後、産業副産物起源のコンクリート用混和材の使用実績を増やして仕様書等への基準化を進め、設計や施工において使いやすい材料にすることが期待されるが、そのためには、産官学が一体となって産業副産物の混和材利用を促進させる積極的な取り組みが必要と考えられる。

4章 産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する最近の取り組み

4.1 環境負荷低減の観点

産業副産物起源のコンクリート用混和材の有効利用についての視点のひとつは環境負荷低減であり、具体的には、コンクリート骨材の代替による天然資源の保護や廃棄物処分量の低減、セメント代替によるCO₂排出量の抑制効果等といった取り組みがあげられる。

現在、環境省では、総合環境政策、地球環境・国際環境協力、廃棄物・リサイクル対策、自然環境・生物多様性、大気環境・自動車対策、水・土壌・地盤・海洋環境の保全、保険・化学物質対策、地方環境対策の8分野の政策を進めている¹⁾。

総合環境政策に係わる基本的施策としては、循環型社会の形成促進、廃棄物の発生抑制・資源の有効活用、リサイクル材料を使用した製品の認定などが行われている²⁾。このうちリサイクル製品については、エコマークなどで表示され、グリーン購入法に基づき、環境対策技術や製品の国内外への普及が進められている³⁾。

こうしたなか土木・建設用リサイクル資材、特にコンクリートについては、スラグ系とアッシュ系の混和材が産業副産物由来の資源として活用されている。スラグ系については、鉄鋼産業由来の高炉スラグや焼却施設から発生するゴミ熔融スラグ等があげられ、アッシュ系は火力発電所から発生する石炭灰や製紙工場から発生するペーパーラジニアッシュなどがある。北海道認定のリサイクル製品としては、石炭灰(フライアッシュ)を利用したコンクリート製品、鉋さい(高炉スラグ)やばいじん(石炭灰)を使用した高炉セメントB種および断面修復材がリサイクル認定を受けている(図4.1.1)。なお、スラグ系とアッシュ系以外の産業副産物由来の資源も、コンクリート関連製品としてリサイクル認定を受けているものがある⁴⁾。



図 4.1.1 平成 28 年度版北海道認定リサイクル製品パンフレット表紙

さらにCO₂排出量の抑制については、2016年のCOP21(気候変動枠組条約第21回締約国会議)で採択されたパリ協定において、わが国は2030年までに2013年比で26%の温室効果ガスを排出削減することが目標とされている。一方、日本の2015年のCO₂排出量は図4.1.2に示すように12億2700万トンと報告されており⁵⁾、そのうち工業プロセスと産業部門を合わせた排出量の約5%が、セメント産業から排出されるCO₂排出量に相当し、地球温暖化問題の主要因の一つとなっている⁶⁾。そのため積極的な産業副産物起源のコンクリート用混和材の利用などに取り組む必要がある。

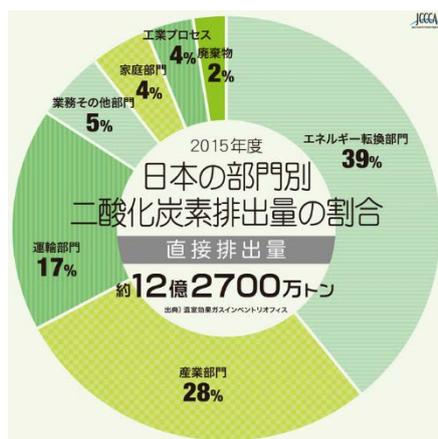


図 4.1.2 日本の部門別二酸化炭素排出量の割合 -各部門の直接排出量-⁶⁾

こうしたなか、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)などにより、産業副産物起源のコンクリート用混和材の使用による低エネルギー消費・低 CO₂ 排出量の低炭素型セメントやコンクリートの開発が進められている⁷⁾。たとえば民間企業 7 社と 1 大学で構成される NEDO プロジェクト(2008～2013 年間)においては、鉄鋼産業副産物である高炉スラグを成分とする「ECM セメント」が開発されている。ECM セメントは、多量の高炉スラグを使用することで従来セメントよりエネルギー消費量と CO₂ 排出量を 6 割以上も削減し、しかも高い性能を持った画期的な混合セメントである(図 4.1.3 参照)。

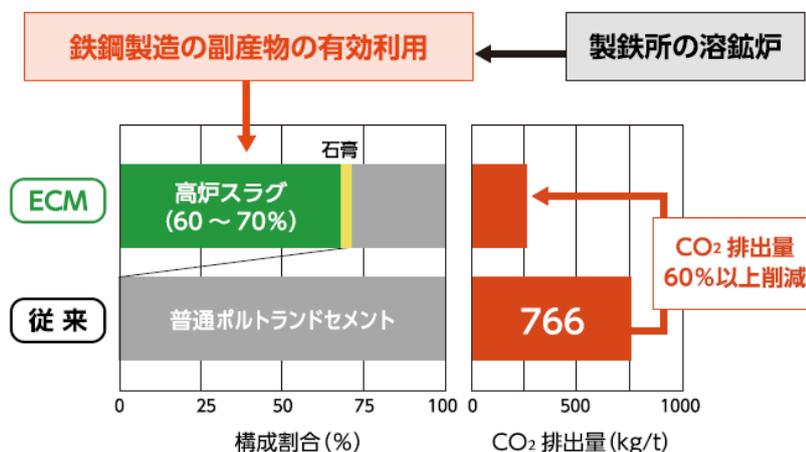


図 4.1.3 ECMによるCO₂排出量削減効果目標⁷⁾

4.2 品質・性能向上の観点

土木・建築分野では少子高齢化の余波を受け、労働者はもとより技術者が減少しており、インフラの整備や維持・管理を行う人材不足は否めない。こうした状況下で、既存のインフラ維持やこれからの時代に適合した都市機能の実現等を持続的に進めていくためには、土木・建築産業における品質の確保と生産性の向上を、ともに実現する仕組みが必要とされている。こうしたなか、国土交通省では平成 28 年から ICT 技術の全面的な活用による建設現場の生産性向上を図るため

「i-Construction」を推進しており^{8,9)}、このうちのコンクリート生産性向上検討協議会では「流動性を高めた現場打ちコンクリートの活用に関するガイドライン」(平成29年3月)を策定した¹⁰⁾。このガイドラインでは、今後の施工技術の自動化・高度化に伴う高流動コンクリートの使用を想定し、高流動コンクリートを用いる際の留意点に言及している。すなわち、高流動コンクリートを用いる際は、通常より単位セメント量(単位結合材量)が多くなることが想定されるため、ASRや水和に伴う温度ひび割れ抑制等の構造物の耐久性に係わる項目を照査する必要があるというものである。周知の通りASR抑制ではポズラン反応性を有する産業副産物由来のコンクリート用混和材の積極的な利用が、また、流動性を高めたコンクリートでは材料分離が、硬化したコンクリートの耐久性を大きく左右するため、フレッシュ性状の改善目的で産業副産物起源のコンクリート用混和材の利用が増えるといった具体的対応の方向性がここから示唆される。

また、内閣府が進めている、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)のインフラ維持管理・更新・マネジメント技術においては、目標のひとつである過酷環境下における新設・架替え床版の高耐久化のなかで、フライアッシュ、高炉スラグなどの混和材の積極利用が位置づけられており、東北地方整備局の「凍結抑制剤散布下におけるRC床版の耐久性確保の手引き(案)」(平成28年10月)に基づく復興道路における高耐久床版の試験実装が紹介されている(道路インフラマネジメントサイクルの展開と国内外への実装を目指した統括的研究)¹¹⁾。

このように産業副産物起源のコンクリート用混和材(特にポズラン反応を有する材)は、使用時の性状や効果などに関し不明な点も未だ多く、今後の基礎研究や技術開発、規格・基準類の充実・強化等といった課題が残されているものの、品質・性能向上に資する材料として今後の利用促進が期待されている。

4.3 新しい利用方法

これまで、産業副産物起源の粉体に関して、コンクリート用混和材の利用としてアッシュ系(フライアッシュ)ならびにスラグ系(高炉スラグ微粉末)を対象に記述してきた。しかし、多くがセメントとの混合であり、産業副産物起源の粉体単独の固化技術は知られていない。例えば、これまでスラグ系の固化体では鉄鋼スラグの潜在水硬性を応用した研究がなされている。この研究はスラグに炭酸ガスまたは消石灰等の何らかのアルカリ刺激を与えて固化させる技術で、スラグ煉瓦やスラグブロック等の実績がある¹²⁾。また、平成15年3月に財団法人沿岸開発技術研究センターでは、鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアルを発行しており、消波根固めや被覆ブロック等に鉄鋼スラグ水和固化体が適応できると検討成果を示している(図4.3.1参照)。このマニュアルには地球環境問題に対しリサイクル材(産業副産物)を主とした循環型環境を構築するとの基本方針があり、その下で開発が進められマニュアルとして発刊された¹³⁾。



図 4.3.1 鉄鋼スラグ水和固化体で製作した被覆ブロックや消波ブロック¹⁴⁾

さらに、昨今、セメントを使用しない無機系固化技術としてジオポリマー技術が脚光を浴びており、建設分野への適用に関する研究委員会が 2015 年に日本コンクリート工学会に設置され、2017 年に活動報告が行われている¹⁵⁾。

このジオポリマーはアルミナシリカ粉末とアルカリ溶液との縮重合反応によって形成される固化体で、アルミナシリカ粉末には産業副産物起源の粉体であるフライアッシュや高炉スラグ微粉末を用い、アルカリ溶液には水ガラスと苛性ソーダの混合溶液などが用いられる。特徴として製造時の CO₂ 排出量が少ないことと各種産業副産物起源の材料が大量に有効利用ができ、セメントコンクリートの弱点である ASR 反応、強酸、高温に対する抵抗性に優れていることから、骨材の枯渇問題への対応や特殊環境での利用が可能である。

ジオポリマーコンクリートでは、セメントコンクリートにおけるセメントと水の体積に当たる分がアルミナシリカ粉末(フライアッシュならびに高炉スラグ微粉末)とアルカリ溶液に置き換わる。この点をみただけでも、産業副産物起源の粉体を大量に使用していることが理解できるであろう(図 4.3.2 参照)。



図 4.3.2 ジオポリマーコンクリートの使用材料と製品一例¹⁶⁾

施工事例では現場打ちの擁壁などが国内で行われており、海外では空港内滑走路終点のターニングロードや誘導路などでの実績がある。また、プレキャスト製品では温泉地域での歩車道境界ブロックや山岳軌道トンネル内の PC 枕木の試験敷設などがあげられており¹⁵⁾、今後に期待する最先端技術である。

参考文献

- 1) 環境省ホームページ <http://www.env.go.jp/seisaku/list/index.html>
- 2) 環境省ホームページ <http://www.env.go.jp/policy/hozen/green/ecolabel/touroku.html#tourokusaki/>
- 3) 環境省ホームページ：環境表示ガイドライン 2013.3
<http://www.env.go.jp/policy/hozen/green/ecolabel/index.html>
- 4) 北海道ホームページ：北海道認定 リサイクル製品 北海道リサイクルブランド
http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ks/jss/recycle_2/h28rninteiseihin01.pdf
- 5) 全国地球温暖化防止活動推進センターホームページ：<http://www.jccca.org/>
- 6) セメント協会ホームページ <http://www.jcassoc.or.jp/>
- 7) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構ホームページ
<http://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201705ecm/index.html>
- 8) 国土交通省ホームページ http://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000028.html
- 9) i-Construction 委員会：国土交通省ホームページ i-Construction ～建設現場の生産性革命～
平成 28 年 4 月 <http://www.mlit.go.jp/common/001127288.pdf>
- 10) 国土交通省東北地方整備局ホームページ
http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/b00097/k00910/kyoutuu/ryuudousei_Co_guide.pdf
- 11) 国立研究開発法人科学技術振興機構ホームページ www.jst.go.jp/sip/dl/k07/k07_RC.pdf
- 12) Fritz Keil 著，沼田晋一訳：高炉スラグ，セメントジャーナル社，扇興企画，2001.7
- 13) 財団法人沿岸開発技術研究センター：沿岸開発技術ライブラリーNo.16 鉄鋼スラグ水和固化
体技術マニュアル -製鋼スラグの有効利用技術-，大光社印刷，2003.3
- 14) JFE スチール株式会社ホームページ www.jfe-steel.co.jp/products/slag/catalog/zlj-002.pdf
- 15) 一宮一夫：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，日本コンクリ
ート工学会，2017.9
- 16) 公益財団法人鉄道総合技術研究所ホームページ RRR 2011.11
<http://bunken.rtri.or.jp/PDF/cdroms1/0004/2011/0004005521.pdf>

資料集

資料 1 石炭灰の発生過程

微粉炭燃焼ボイラにおける石炭灰の発生過程は、おおよそ図 1 に示すとおりであり、発生箇所によって石炭灰はクリンカアッシュとフライアッシュに分類される。

クリンカアッシュ(写真 1)は、赤熱状態でボイラ底部に落下した石炭灰を粉砕機で粉砕したもので、多孔質の砂礫状を呈し石炭灰の約 10%を占める。またフライアッシュ(写真 2)は、燃焼ガス中のばいじんを集じん器で捕集したもので、平均粒径 20 μm 程度の球形微粒子であり石炭灰の約 90%を占める。

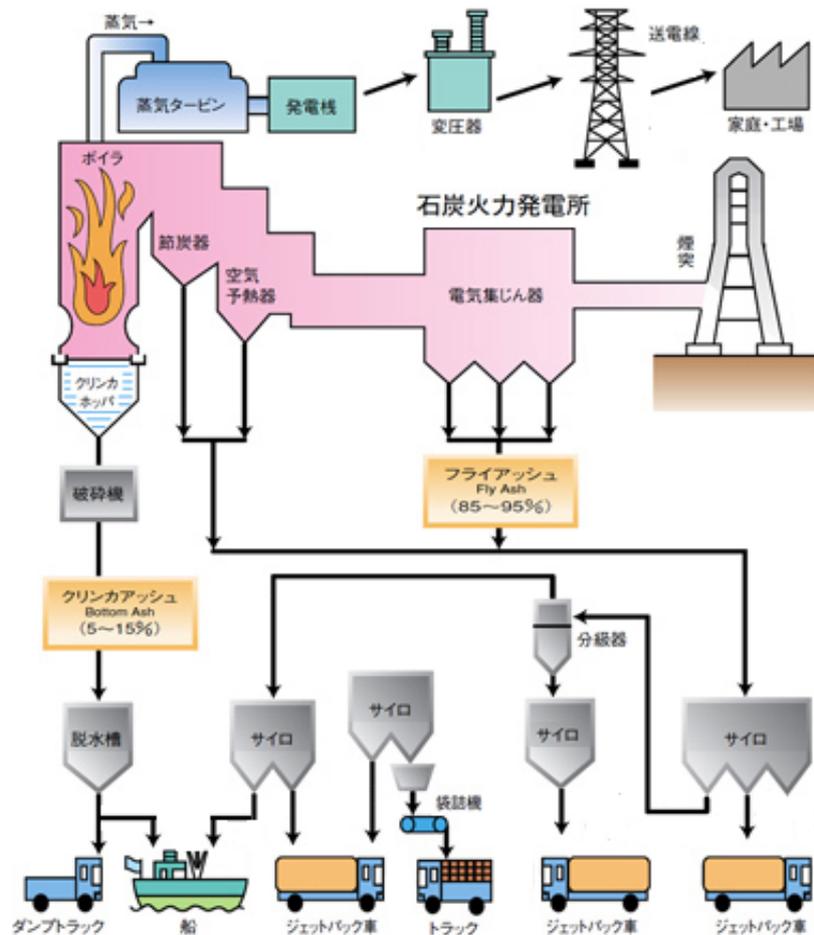


図 1 石炭灰の発生過程



写真 1 クリンカアッシュ



写真 2 フライアッシュ

資料2 コンクリート用フライアッシュの品質基準(JIS A 6201 : 2015)

表1 フライアッシュの品質

項目		フライアッシュ I種	フライアッシュ II種	フライアッシュ III種	フライアッシュ IV種
二酸化けい素含有量 ^{a)} %		45.0 以上			
湿分 %		1.0 以下			
強熱減量 ^{b)} %		3.0 以下	5.0 以下	8.0 以下	5.0 以下
密度 g/cm ³		1.95 以上			
粉末度 ^{c)}	網ふるい方法 (45μm ふるい残分)%	10 以下	40 以下	40 以下	70 以下
	ブレン方法 (比表面積) cm ² /g	5,000 以上	2,500 以上	2,500 以上	1,500 以上
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

注 ^{a)}二酸化けい素含有量は、溶解質量分析方法又は蛍光 X 線分析方法による。

^{b)}強熱減量に代えて、未燃焼炭素含有率の測定を JIS M 8819 又は JIS R 1603 に規定する方法で行い、その結果に対して強熱減量の規定値を適用してもよい。

^{c)}粉末度は、網ふるい方法又はブレン方法による。ただし、網ふるい方法による場合は、ブレン方法による比表面積の試験結果を参考値として併記する。

資料3 フライアッシュコンクリートの利用方式による水セメント比の相違について

フライアッシュコンクリートの結合材としてフライアッシュを使用する方法には、フライアッシュがプレミックスされたフライアッシュセメントを使用する方法(セメント方式)と、フライアッシュを混和材として使用する方法(混和材方式)がある。両方式で同一水結合材比の配合を比較した場合、水セメント比は相違し、混和材方式の水セメント比が大きくなることに注意する必要がある。

表2は、呼び強度27、スランプ12cmのフライアッシュコンクリートの配合例を、フライアッシュ分量15%のフライアッシュセメントを使用したセメント方式と、フライアッシュ置換率15%の混和材方式で比較したものである。

表2 セメント方式と混和材方式の配合比較例

呼び 強度	スランプ (cm)	セメント方式			混和材方式				
		W	C※ ¹	W/C	W	C※ ²	F	W/C	W/(C+F)
27	12	158	291	54.3	158	247	44	64.0	54.3

※1 フライアッシュの分量15%のフライアッシュセメントB種

※2 普通ポルトランドセメント

セメント方式のW/Cの分母Cにはフライアッシュが含まれているが、混和材方式のCは普通ポルトランドセメントでありセメント方式より15%小さくなるため、W/Cが17.6%大きく(54.3%→64.0%)表現される。官公庁の工事仕様書では、コンクリートの耐久性向上対策として水セメント比の上限が定められており、混和材方式では水セメント比が大きくなるためこの上限を超過してしまい、使用できなくなる場合が考えられる。したがって、セメント方式と同様に混和材方式でもフライアッシュコンクリートの利用を可能とするには、混和材使用の場合には水セメント比の上限規定における水セメント比を水結合材比に読み替えるべきである。

なお、土木学会「コンクリート標準示方書」では、良質な混和材を適切に用いた場合には、耐久性から必要な水セメント比の分母をセメントの質量と混和材の質量との和(結合材量)としてよいとされている。

資料4 フライアッシュコンクリートの利用拡大に向けた全国の事例

フライアッシュの特徴に着目し、全国で利用拡大に向けた取り組みが行われている。表3に取組み事例を取りまとめる。

表3 フライアッシュコンクリート普及拡大に関する全国の事例

地域	内 容	背景、経緯	利用促進につながる仕組み
秋田県 能代山本地区	<ul style="list-style-type: none"> 秋田県が県発注の公共工事(セメント種類が高炉セメント B 種となっている構造物)を対象として、H22年度からフライアッシュ混合コンクリートを標準使用とした。 	<ul style="list-style-type: none"> H19 東北電力、東北発電工業、能代山本生コン協組が3者連名で県、国交省出先機関、市町村等へ請願書提出。 県が H19～H21 年度各種検討、調査、試験施工を行い総合評価した後、H22.3 標準使用を通知。 	<ul style="list-style-type: none"> 「最大水セメント比」の「最大水結合材比」への読み替え。(県のフライアッシュ混合コンクリートの標準使用基準)。
東北地方	<ul style="list-style-type: none"> RC床版の試行工事の成果について(「東北地方におけるRC床版の耐久性確保の手引き(案)」)H28.3 発刊。 	<ul style="list-style-type: none"> RC床版の土砂化の要因である凍害、凍結防止剤による塩害、塩分環境下のASR等の外力に対し、フライアッシュの混入や高炉セメントの使用により耐久性を確保。 研究成果と試行事例をもとに設計・施工方法等を記載。 	<ul style="list-style-type: none"> 試行工事による検証。 「凍結抑制剤散布下におけるRC床版の耐久性確保の手引き(案)」H28.10(内閣府SIP)にも反映。
北陸地方	<ul style="list-style-type: none"> 富山、石川、福井各県および国交省がフライアッシュコンクリートのモデル工事を H25 年度から発注している。 石川県は七尾市をモデル地区(原則、フライアッシュコンクリートを使用)に指定した。 福井県は嶺北地方と敦賀市を推進地区(フライアッシュコンクリートを推奨)に指定した。 	<ul style="list-style-type: none"> H23.1 北陸電力や北陸3県の産官学で発足した「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会」が、H25.6「北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの配合・製造および施工マニュアル(案)」を作成。 アルカリシリカ反応と塩害対策による「構造物の長寿命化」、地域副産物であるフライアッシュを活用することによる「環境負荷低減」が地域的ニーズ。 	<ul style="list-style-type: none"> 富山県17工場、石川県14工場、福井県13工場(フライアッシュ利用生コン工場数：H27.3 現在) 「水セメント比」の「水結合材比」への置き換え。
関西地方	<ul style="list-style-type: none"> 大阪広域生コン協組がフライアッシュコンクリートの標準配合(保証材齢28日、56日)を作成して、フライアッシュコンクリートの出荷体制を整備している。 	<ul style="list-style-type: none"> 関電パワーテック、大阪広域生コン協組が日本建築学会近畿支部へ「フライアッシュ使用コンクリートの特性に関する調査研究」を委託し、H26.7 技術資料を作成。 	<ul style="list-style-type: none"> 関西電力舞鶴火力と中部電力碧南火力との相互供給体制の構築(安定供給の確保)。 大阪府41工場、兵庫県19工場(標準配合整備の生コン工場数：H27.3 現在)。
長崎県	<ul style="list-style-type: none"> 長崎県は、土木部の発注工事におけるコンクリート構造物の品質向上を目指し、H27.1「長崎県におけるフライアッシュコンクリートの配合・製造及び施工指針」を策定、H27年度建設工事共通仕様書に記載した。 セメントは高炉セメント B 種使用を原則とし、セメントの10±2%をフライアッシュで置換した「標準型」と10%を超え20%以下を置換した「低熱型」が整備された。 	<ul style="list-style-type: none"> 「フライアッシュ利用促進検討委員会」(H20～21)、「長崎県におけるフライアッシュコンクリート指針作成検討会」(H23)の成果を受けて、県の「フライアッシュコンクリート利用指針作成検討委員会」がH26年末指針案と技術資料を作成。 	<ul style="list-style-type: none"> 長崎県8工場(フライアッシュ利用生コン工場数：H27.3 現在) フライアッシュを混和材として用いる場合の「最大水セメント比」の「最大水結合材比」への読み替え(共通仕様書)。
沖縄県	<ul style="list-style-type: none"> 沖縄県は、土木建築部発注の土木用コンクリートに適用する「沖縄県におけるフライアッシュコンクリートの配合及び施工指針(案)」をH29.12策定した。 耐久性向上効果などの目的に応じ、①内割+外割、②内割、③外割の3配合タイプを提示した。 	<ul style="list-style-type: none"> H26.1 県土木建築部が、環境負荷低減やコンクリート構造物の耐久性向上を図る目的で、フライアッシュコンクリートの使用検討を関連部署に通知。 その後「沖縄県におけるフライアッシュコンクリート配合及び施工指針検討委員会」を設置し指針を整備した。 	<ul style="list-style-type: none"> 「水セメント比」の「水結合材比」への読み替え。

資料5 高炉スラグ微粉末の発生過程

高炉スラグの製造フローを図2に示す。高炉スラグは製鉄過程における高炉(溶鉱炉)で鉄鉱石に含まれる鉄以外の成分と石灰石、コークス内の灰分が熔融分離回収されたもので、主な化学成分はCaO、SiO₂、Al₂O₃、MgOとポルトランドセメントと類似している。高炉スラグは銑鉄1tあたり約290kg生成される。回収されたスラグは約1500℃の熔融状態であり、その冷却方法により、徐冷スラグと水砕スラグに分類される。

徐冷スラグと水砕スラグの外観を写真3に示す。徐冷スラグは大気中での自然放冷と適度な散水により徐冷処理され、結晶質の塊状となる。破碎、粒度調整され、道路用路盤材、コンクリート用粗骨材として用いられる。

水砕スラグは圧力水により急激に冷却処理されたもので、結晶化せずガラス質の粒状となる。このため急冷された高炉スラグは、水酸化カルシウムなどのアルカリ性物質の刺激により水和・硬化する潜在水硬性を有する。微粉末化された水砕スラグである高炉スラグ微粉末は高炉セメントの原料となり、水砕スラグを粒度調整したものはコンクリート用細骨材などに用いられる。

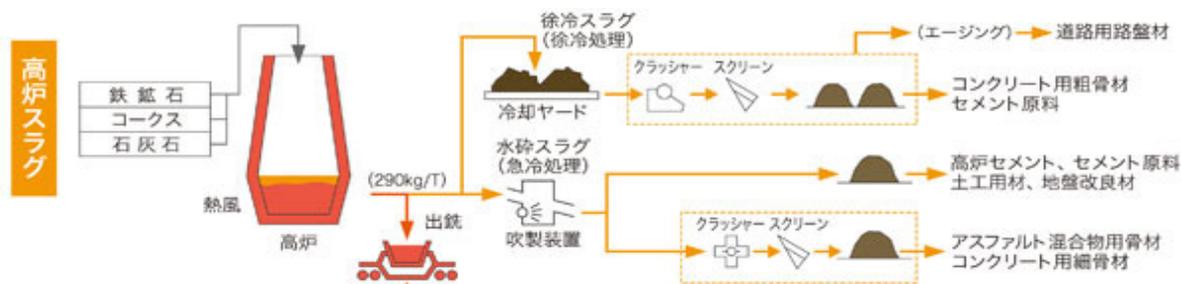


図2 高炉スラグの製造フロー

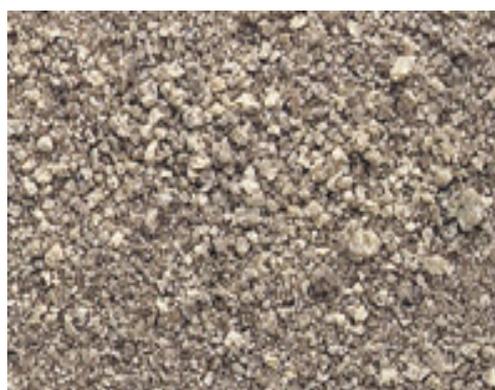


写真3 徐冷スラグ(左)と水砕スラグ(右)の外観

資料6 コンクリート用高炉スラグ微粉末の品質基準(JIS A 6206 : 2013)

高炉スラグ微粉末の品質基準を表4に示す。この品質基準は、JIS A 6206 “コンクリート用高炉スラグ微粉末”に規定されているものである。種類は比表面積による粉末度で、3000、4000、6000 および 8000 の4品種がある。

3000は、より低発熱性を有する高炉セメントのニーズに応えるために、低発熱型高炉セメント用の混合材として製造が始まり、2013年のJIS改正の際、新たに加えられた。4000は、高炉セメントの混合材として多く用いられ、市販流通している量も多い。6000、8000は耐久性、強度発現などの特性を高性能化する場合に用いられる。

北海道では、日鉄住金セメント社が高炉スラグ微粉末を製造している。ニーズの少ない3000を除く、4000、6000、8000をラインナップしている。

表4 高炉スラグ微粉末の品質基準

品質 \ 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	高炉スラグ 微粉末 8000
密度	(g/cm ³)	2.80 以上	2.80 以上	2.80 以上	2.80 以上
比表面積	(cm ² /g)	2750 以上	3500 以上	5000 以上	7000 以上
		3500 未満	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
	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

資料7 高炉セメントB種を用いた厳寒期の施工¹⁾

北海道の土木工事では地域にもよるが、養生コスト、作業性の面から高炉セメントB種のコンクリートは11月頃から普通ポルトランドセメントあるいは早強ポルトランドセメントのコンクリートに変更されるのが一般的である。しかし、新水路を掘削し分流堰を新設する千代田新水路分流堰本体工事(発注者：国土交通省北海道開発局帯広開発建設部，総工費約14億円)では、寒冷期に高炉セメントB種を用いたコンクリートの大規模土木工事が行われた。

工期は平成14年9月4日から平成16年2月20日までであった。分流堰は堰柱5基，中間床版12基，堰幅179.2m，堰長22.5mである。水叩きは上流側が長さ10m，施工幅177.2m，下流側が長さ20m，施工幅177.2mである。コンクリートは，グリーン購入法による調達となり，また夏期における水和熱低減の関係から高炉セメントB種が採用された。生コンクリートの打込み量はおよそ3万m³であり，施工現場近隣の生コン工場の2工場から供給された(呼び強度24，スランプ8cm，空気量4.5%)。

この地域では11月頃から気温が下がり始め日平均気温は4℃以下となり，1月では最低気温は-20℃以下，日平均気温でも-10℃前後となる。厳寒期のコンクリートの製造では，骨材は上屋付きのヤードにあるが，凍結するため蒸気加温を行った。練混ぜは，コンクリートの運搬中の温度降下を見込んで温水を用いて12～16℃とし，荷卸し時に10～14℃を目標とした。打込みは最大吐出量115m³/hのポンプ車を用いた。堰体は温度応力によるひび割れを避けるため，10m間隔のブロックに分け1つおきに打ち込んだ。養生は，給熱養生用に打込み箇所を大きく覆うように鉄パイプとビニールシートで養生囲いを設けた。また内部においてもブロックごとによるシートの仕切りを設置した。ヒーターはコンクリートファーンレスでA重油(10.0L/hで75000kcal/h)を使用した。養生囲い内には暖気ダクトでブロックごとにコンクリートの前後から温風を導き，囲い内の温度を15℃に保った。打ち込まれたコンクリートの天端は乾燥を防ぎ保温のためにEPS板を被せた。

コンクリートの内部温度は自動計測システムで計測し，コンクリート強度は現場養生供試体でも確認した。型枠は所要強度が出てから取り外したが，養生囲いは4月21日まで設置した。

これにより，1月の最低気温-26.6℃，平均気温-9.7℃と過酷な気象条件の中でも堰体工事は凍害を受けることなく，またひび割れを生じることなく無事終了した。一般に，高炉セメントB種は普通ポルトランドセメントよりも低温時の影響を受けやすく，ブリーディングが多くなり，凝結時間が遅延する，初期凍害を受けやすいことなどが指摘されているが，コンクリートの製造，圧送，打込み，養生を適切に行えば，問題となる支障は生じないことが実証された。

参考文献

- 1) 杉山隆文，井上真澄，小野寺収，澤村秀治：積雪寒冷地におけるコンクリート用混和材としての高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの利用，コンクリート工学，Vol.54，No.9，pp.907-913，2016

資料 8 北海道での使用事例集

1. フライアッシュ

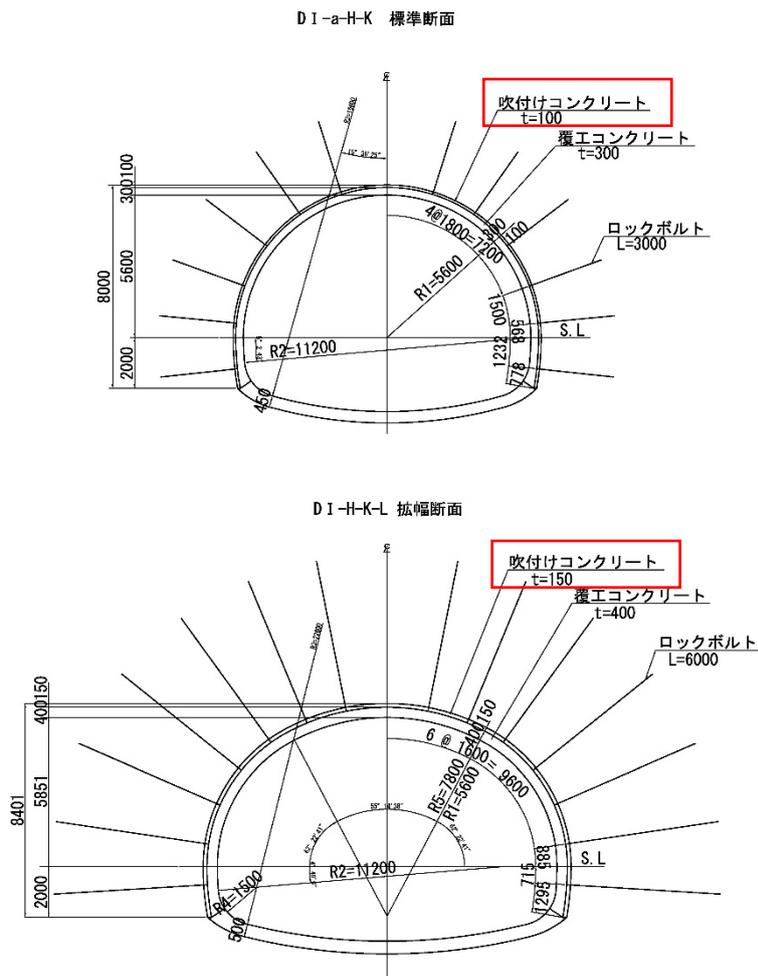
- 整理番号 1-1 吹付けコンクリート
1-2 覆工コンクリート
1-3 LNG 地上式貯槽
1-4 プレキャストコンクリート製品(道路用製品)
1-5 建物基礎

2. 高炉スラグ微粉末(高炉セメント)

- 整理番号 2-1 ポストテンションセグメント方式 PC 単純 T 桁橋
2-2 鉄筋コンクリート橋脚基礎

産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究委員会 産業副産物活用事例集								整理番号 1-1	
工事件名		北海道横断自動車道 第二天神トンネル工事							
発注者		東日本高速道路株式会社 北海道支社							
構造物の種別		トンネル (吹付けコンクリート)							
産業副産物活用の目的:									
<ul style="list-style-type: none"> トンネル吹付けコンクリートのはね返り率の低減 トンネル吹付けコンクリート施工時の粉じん濃度の低減 									
配合設計のコンセプト:									
<ul style="list-style-type: none"> 細骨材に使用する石狩市志美産砂に対して、これまでの吹付用細骨材としての使用実績から、6%程度(容積比)のフライアッシュ置換を行う。これにより、単位水量の増加に依拠しない目標スランプの確保と付着性能の向上および発生粉じん量の低減を図る。 									
計画配合(kg/m ³)									
セメント	混和材 1	混和材 2	水	細骨材 1	細骨材 2	粗骨材 1	粗骨材 2	混和剤 1	混和剤 2
C	F1	F2	W	S1	S2	G3	G2	Ad1	Ad2
450	90	—	189	911	—	747	—	5.85	0.09
水結合材比		42.0%			空気量		3% (試験吹付け時)		
細骨材率		58.0%			粗骨材最大寸法		15mm		
呼び強度		36			強度指定材齢		28日		
その他材料・配合に関する特記事項:									
<ul style="list-style-type: none"> 試験練りより、粘性を改善するため、フライアッシュの置換を6%から10%(容積比)とした。 									
施工時期・養生条件など:									
(施工時期)									
<ul style="list-style-type: none"> 平成25年10月～平成28年9月(冬季間も施工) 									
(養生)									
<ul style="list-style-type: none"> 特別な養生は実施していない 									

構図物の概要・構造一般図など:



産業副産物活用の効果:

- ・一般的なトンネルのはね返り率の実績が 20%~30%であるのに対して、試験吹付けでののはね返り率は 18.0%であった。
- ・「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」での粉じん濃度目標レベル 3.0mg/m³以下に対し、施工時の粉じん濃度は 0.3~1.7mg/m³(坑口部除く)であった。

産業副産物活用の課題, 改善点, 今後の展望など:

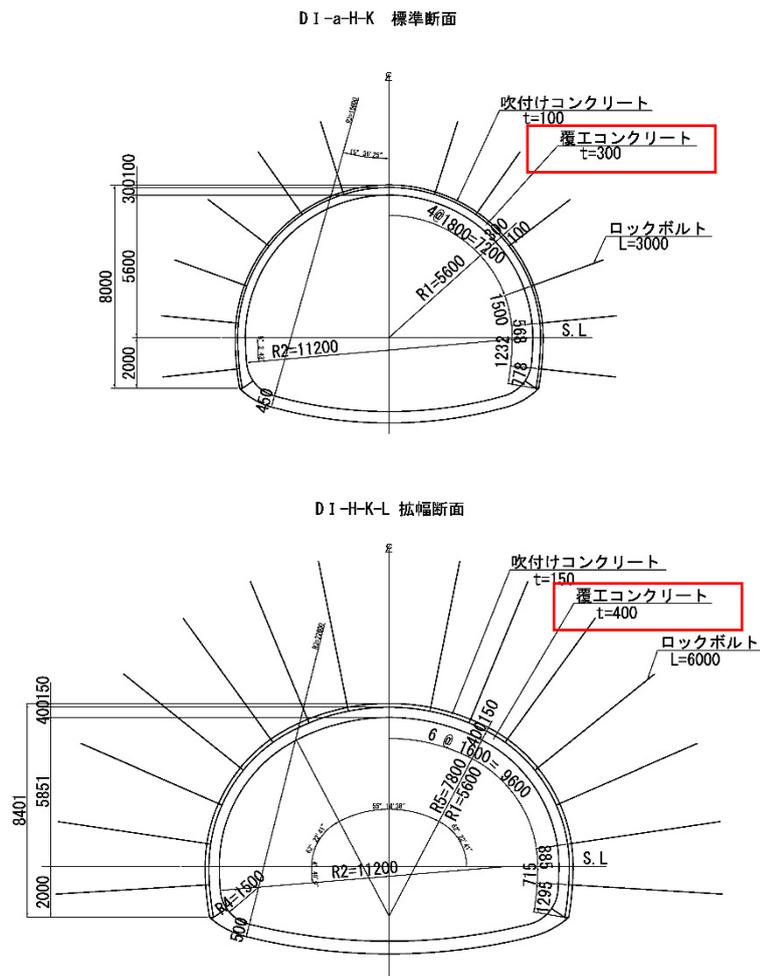
- ・今回の施工で問題はなかったが、フライアッシュを使用する上で、長期間、品質のばらつきがないものを安定供給することが重要と考える。

参考文献:

記入者 | 東日本高速道路株式会社 北海道支社

産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究委員会 産業副産物活用事例集								整理番号	
								1-2	
工事件名		北海道横断自動車道 第二天神トンネル工事							
発注者		東日本高速道路株式会社 北海道支社							
構造物の種別		トンネル (覆工コンクリート)							
産業副産物活用の目的:									
<ul style="list-style-type: none"> トンネル覆工コンクリートの施工性の改善 トンネル覆工コンクリートの品質の向上 									
配合設計のコンセプト:									
<ul style="list-style-type: none"> 特記仕様書に記載される計画配合を基本とするが、スランプフロー等の基準を満たすために細骨材混合比率、細骨材率、単位水量、混和剤添加量を修正し、計画配合を作成した。 									
計画配合(kg/m ³)									
セメント	混和材 1	混和材 2	水	細骨材 1	細骨材 2	粗骨材 1	粗骨材 2	混和剤 1	混和剤 2
C	F1	F2	W	S1	S2	G3	G2	Ad1	Ad2
270	100	—	180	338	515	866	—	6.66	0.09
水結合材比		66.7%			空気量		4.5±1.5%		
細骨材率		50.0%			粗骨材最大寸法		20mm		
呼び強度		18			強度指定材齢		28 日		
その他材料・配合に関する特記事項:									
<ul style="list-style-type: none"> 繊維補強材(バルチップ JK) 0.35% 後添加 									
施工時期・養生条件など:									
(施工時期)									
<ul style="list-style-type: none"> 平成 27 年 2 月～平成 29 年 7 月(冬季間も施工) 									
(養生)									
<ul style="list-style-type: none"> トンネルバルーンによる保温養生 アクアカーテン工法による 28 日間湿潤養生 									

構造物の概要・構造一般図など:



産業副産物活用の効果:

- ・コンクリートのワーカビリティが向上したことで、良好な仕上がり面となった。
- ・コンクリートの仕上がり面にひび割れが発生しなかった(セメント量の低減による乾燥収縮率の減少や水和熱の減少効果が考えられる)。

産業副産物活用の課題、改善点、今後の展望など:

- ・今回の施工で問題はなかったが、フライアッシュを使用する上で、長期間、品質のばらつきがないものを安定供給することが重要と考える。

参考文献:

記入者 東日本高速道路株式会社 北海道支社

産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究委員会 産業副産物活用事例集							整理番号	
							1-3	
工事件名		石狩湾新港発電所新設工事のうち石狩 LNG 基地 No.3 貯槽(土木)設置工事						
発注者		北海道電力株式会社						
構造物の種別		LNG 地上式貯槽						
産業副産物活用の目的:								
発注者の要求により以下の品質確保の目的から使用している.								
<ul style="list-style-type: none"> 温度ひび割れの抑制: 施工時ひび割れ発生率 5%以下(LNG 地上式貯槽指針より) 耐久性の確保: 護岸から 30m に立地し厳しい飛来塩分環境, 冬季および LNG(-162°C)による凍結融解環境 								
配合設計のコンセプト:C 種・・・置換率 30%, FC=N+FA もしくはフライアッシュセメント C 種, MFC=M+FA								
部 位		配 合			備 考			
①	基礎版	30-18-20FCM			約 10,000m ³ の打設のため, 7ブランド, 2セメントメーカー, プレミックス方式・混和材方式となる. 事前に強度特性に差異がないことを確認.			
②	防液堤 #1	60-55-20MFC			構造解析結果より, 設計基準強度を 60N/mm ² とした. 鉛直方向 PC 鋼棒緊張のため, $\sigma_3 \geq 27\text{N/mm}^2$ を確認.			
③	防液堤 #2, 11	50-55-20MFC			構造解析結果より, 設計基準強度を 50N/mm ² とした. 鉛直方向 PC 鋼棒緊張のため, $\sigma_7 \geq 27\text{N/mm}^2$ を確認.			
④	防液堤 #3	40-18-20FCM			構造解析結果より, 設計基準強度を 40N/mm ² とした.			
⑤	防液堤 #4~10	30-18-20FCM			構造解析結果より, 設計基準強度を 30N/mm ² とした.			
① 基礎版 計画配合(kg/m ³)代表例 (N+FA) SL=18cm±2.5								
セメント C	混和材 1 FA	混和材 2 EX	水 W	細骨材 1 S1	細骨材 2 S2	粗骨材 1 G1	粗骨材 2 G2	混和剤 SP
217	93	—	150	881	—	954	—	3.10
水結合材比		48.5 %	空気量		5.0 ± 1.5 %	細骨材率		47.9 %
粗骨材最大寸法		20 mm	呼び強度		30	強度指定材齢		91 日
② 防液堤 #1 計画配合(kg/m ³) (M+FA) SF=55cm±7.5								
セメント C	混和材 1 FA	混和材 2 EX	水 W	細骨材 1 S1	細骨材 2 S2	粗骨材 1 G1	粗骨材 2 G2	混和剤 SP
301	129	20	135	764	—	986	—	4.05
水結合材比		30.0 %	空気量		5.0 ± 1.5 %	細骨材率		43.6 %
粗骨材最大寸法		20 mm	呼び強度		60	強度指定材齢		91 日
③ 防液堤 #2, 11 計画配合(kg/m ³) (M+FA) SF=55cm±7.5								
セメント C	混和材 1 FA	混和材 2 EX	水 W	細骨材 1 S1	細骨材 2 S2	粗骨材 1 G1	粗骨材 2 G2	混和剤 SP
249	106	20	135	817	—	1002	—	3.38
水結合材比		36.0 %	空気量		5.0 ± 1.5 %	細骨材率		47.9 %
粗骨材最大寸法		20 mm	呼び強度		50	強度指定材齢		91 日

④ 防液堤 #3 計画配合(kg/m ³) (N+FA) SL=18cm±2.5								
セメント C	混和材 1 FA	混和材 2 EX	水 W	細骨材 1 S1	細骨材 2 S2	粗骨材 1 G1	粗骨材 2 G2	混和剤 SP
264	113	20	149	804	—	954	—	3.97
水結合材比		37.6 %	空気量		5.0 ± 1.5 %	細骨材率		45.6 %
粗骨材最大寸法		20 mm	呼び強度		40	強度指定材齢		91 日
⑤ 防液堤 #4~10 計画配合(kg/m ³) (N+FA) SL=18cm±2.5								
セメント C	混和材 1 FA	混和材 2 EX	水 W	細骨材 1 S1	細骨材 2 S2	粗骨材 1 G1	粗骨材 2 G2	混和剤 SP
203	87	20	149	886	—	954	—	3.10
水結合材比		48.1 %	空気量		5.0 ± 1.5 %	細骨材率		48.1 %
粗骨材最大寸法		20 mm	呼び強度		30	強度指定材齢		91 日

その他材料・配合に関する特記事項:

■配合表の記号について

- ・混和材 2 : EX は膨張材
- ・混和剤 : SP は, 配合②③が高性能 AE 減水剤, 配合①④⑤が多機能 AE 減水剤

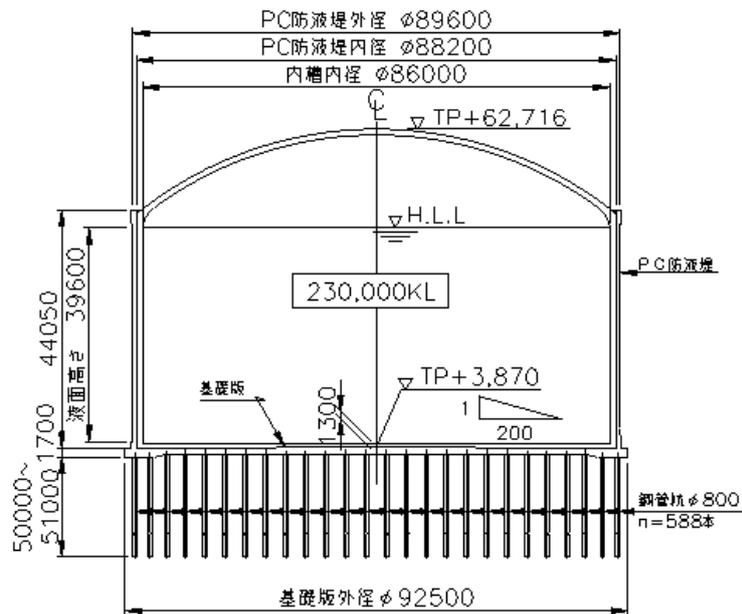
■使用・施工にあたって実施した試験

- ・温度ひび割れ解析のために実施した試験 : 断熱温度上昇試験, 自己収縮試験, 膨張試験
- ・初期強度試験 : #1 および 2(PC 鋼棒緊張), #8(寒中コンクリート)
- ・構造解析のために実施した試験 : 長期強度および静弾性係数の確認
- ・耐久性確認のために実施した試験 : 凍結融解試験, 塩化物イオン浸漬試験
- ・実施工における確認 : σ360 の確認, 温度計測

施工時期・養生条件など:

リフト割り	打設位置	打設日	数量(m ³)	備考
	防液堤#11	2016/07/05	720	
	防液堤#10	2016/05/02	1,023	
	防液堤#9	2016/04/12	1,023	
	防液堤#8	2015/11/16	1,019	寒中コンクリート, 保温&給熱養生
	防液堤#7	2015/10/29	1,007	保温養生
	防液堤#6	2015/10/15	1,015	
	防液堤#5	2015/09/21	995	
	防液堤#4	2015/09/05	990	
	防液堤#3	2015/08/21	920	
	防液堤#2	2015/07/08	356	
	防液堤#1	2015/06/22	537	
	基礎版	2015/05/23	9,567	保温養生(温度ひび割れ対策)

構造物の概要・構造一般図など:



産業副産物活用の効果:

- ・ボールベアリング効果による単位水量の低減: 配合②③④は水結合材比が 40% 以下
- ・温度ひび割れの抑制: 未発生
- ・長期強度の発現: (例)基礎版配合 材齢 91 日に対し 360 日の強度増進率は 15~35% 程度
- ・耐塩害性の確保: 普通セメントと同程度
- ・自己収縮量の低減: (例)防液堤#1 配合 M 推定値(マスコン指針算定式) ϵ_{30} =約 200 μ に対し MFC 実測値 ϵ_{30} =約 80 μ
- ・副次的には, 環境負荷低減

その他試験より得た知見:

※一般的にフライアッシュセメントは空気量変動しやすいと言われているが, 本工事においては規格外がなく, 安定した結果であった(メーカーの製造技術・品質管理が確立している).

※初期強度の発現が懸念されたが, 試験の結果, 普通コンクリートと同等であった.

※水結合材比が 50% 以下であれば, 相対弾性係数は 90% 程度.

産業副産物活用の課題, 改善点, 今後の展望など:

■課題

- ・標準配合

FC の需要が少ないため, 標準配合(JIS)として保有しているプラントがない. 打設が大量の場合や継続的に使用する場合に, 試験練りを行うのが一般的である.

- ・セメントサイロ

通常のプラントにおいては, 2 分割のセメントサイロが設置されており, 夏季には N および BB, 冬季には N および H を貯蔵するのが一般的である. 従って, どちらかを空にして FA に入れ替える煩雑な作業を伴うため, プラントの積極的な協力が得られない場合は適用が難しい.

・工事費

現状、FCは電力施設やダムなど特定の工事に用いられることが多く、一般工事への適用は少ない。一般工事においては、サイロや材料費、試験練りなど費用や手間も課題があり、発注者からの要求がない場合には、自主的に用いることは稀である。

■改善点・展望

FCの適用にあたっては、上述のとおり技術・品質面より、プラント設備や供給面によるところが大きい。現状として普及を図るためには、BBと同様にプレミックス化を推進し、かつ配合も標準化(JIS化)することが望ましい。

参考文献:

■土木学会全国大会(H28.9)

- ・フライアッシュを用いたコンクリートの各種物性試験
- ・フライアッシュを用いたコンクリートの実構造物寸法での温度計測について
- ・フライアッシュを用いたコンクリートの大量打設に伴う配合選定

■電力土木会誌(H30.3)

- ・大規模PCLNG貯槽コンクリートへのフライアッシュ置換セメントの適用

記入者	清水建設株式会社 北海道支店
-----	----------------

産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究委員会 産業副産物活用事例集								整理番号	
								1-4	
工事件名									
発注者									
構造物の種別		プレキャストコンクリート製品(道路用製品)							
産業副産物活用の目的:									
<p>現在、国土交通省は、建設現場における生産性の向上を目指して「i-Construction」委員会を設置している。「i-Construction」で検討されている項目の主な3つの取り組みの1つとして、過去30年間建設現場での生産性が向上していないコンクリート工が課題とされ、その対策としてプレキャスト工場製品を積極的に設計・使用するような検討が進められている。</p> <p>建設現場におけるコンクリート工の考え方が変化する中で、プレキャスト製品の需要が増大することが予想される。しかしながら、プレキャスト製品の需要増大に対し製品工場の生産能力が低下している現在、製品工場での生産性向上もあわせて行わなければならない。プレキャストコンクリート製品の国内需要は1990年をピークに減少し、2010年には約半分程度まで落ち込み、各地で工場縮小、人員削減などのリストラを敢行しながらプレキャスト製品会社の経営を維持してきた経緯があり、プレキャスト製品の需要増大に対応するためには、製品工場の生産性向上は喫緊の課題である。</p> <p>当社では、プレキャスト製品工場の生産性を向上させることを目的として、高流動コンクリートを用いてコンクリート打設の無振動化および補修作業の軽減を図っている。粉体系の高流動コンクリート材料として、高品質で安価なフライアッシュが必要不可欠であり、それが活用の理由である。</p>									
配合設計のコンセプト:									
<p>高流動コンクリートは、高い流動性と材料不分離抵抗性を併せ持つことが求められる。この相反する条件を満足させるために注意している点は、粉体材料の使用量と、フライアッシュの置換率にある。粉体材料の全てをセメントにした場合は必要以上に粘性が増し作業性の低下を招くことや、製品の美観(気泡)が悪くなる。さらに、コストの上昇が経営を圧迫する。一方、粉体材料の一部にフライアッシュを置換した場合、流動性の向上(粘性の低下)とコスト低下の改善効果があり、粉体系高流動コンクリートをより安く、高品質にするために必要な材料と考える。</p>									
計画配合(kg/m³)									
セメント	混和材 1	混和材 2	水	細骨材 1	細骨材 2	粗骨材 1	粗骨材 2	混和剤 1	混和剤 2
C	F1	F2	W	S1	S2	G3	G2	Ad1	Ad2
380	170	—	170	837	—	759	—	4.40	—
水結合材比		30.9%			空気量		4.5±1.5%		
細骨材率		52.6%			粗骨材最大寸法		20mm		
呼び強度		35			強度指定材齢		14日		
その他材料・配合に関する特記事項:									
<ul style="list-style-type: none"> ・スランプフロー到達時間(秒) 2~12(35~60) ()は停止時間 ・V75 漏斗流下時間(秒) 9~12 ・充填高さ(障害条件 R1)(mm) 300~360 									

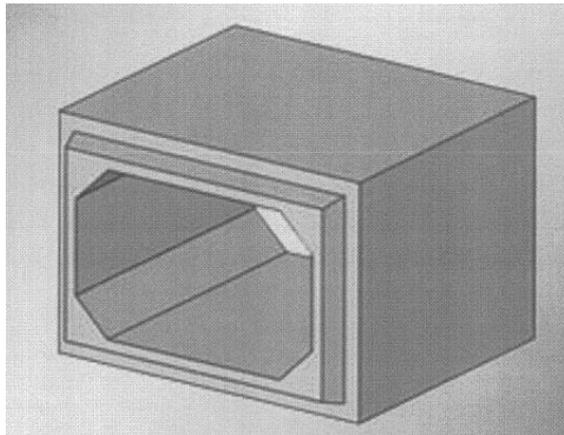
施工時期・養生条件など:

プレキャストコンクリート製品工場では、翌日に脱型を行うため、コンクリート打ち込み後蒸気養生を行う。蒸気養生の温度履歴は、下記の通りである。

- ・前養生 : 20℃ (2 時間)
- ・昇温 : 20℃/時間以下
- ・最高温度 : 60℃ (3 時間保持)

構造物の概要・構造一般図など:

適用例～ボックスカルバート～



産業副産物活用の効果:

- ・コスト低減
- ・品質向上(流動性, 外観, 長期強度)
- ・耐久性の向上(乾燥収縮)

産業副産物活用の課題, 改善点, 今後の展望など:

・未燃焼カーボンの量で、コンクリート中の空気量が変化する。多少高くても、品質にバラツキがなければ専用の AE 助剤で対応できるので、品質変動を少なくして欲しい。

参考文献:

記入者	株式会社上田商会
-----	----------

産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究委員会 産業副産物活用事例集								整理番号	
								1-5	
工事件名	(仮称)緊急事態応急対策拠点施設新築工事(2 工区)								
発注者	北海道								
構造物の種別	建物基礎								
産業副産物活用の目的:									
<p>本建築物の地中梁には、幅 5.0m、高さ 3.0m の大断面部材が採用された。また、建設地周辺の生コン工場では、粗骨材としてアルカリシリカ反応性による区分 B の砕石が用いられるといった地域性を有する。このような施工条件であるため、基礎構造物の温度ひび割れを防止するとともに、アルカリシリカ反応抑制対策を講じることを主な目的として、フライアッシュセメント B 種を採用することとした。</p>									
配合設計のコンセプト:									
<p>マスコンクリートの温度ひび割れを抑制するためには、低発熱型セメントの使用や単位セメント量の低減が有効である。本工事においては、フライアッシュセメント B 種を採用し、かつ高性能 AE 減水剤と呼び強度を保証する材齢を延長することで単位セメント量の低減を試みた。</p> <p>しかしながら、使用する生コン工場の配合仕様では呼び強度を保証する材齢は 28 日のみであり、単位セメントの低減量に関しては限定的な結果となった。</p>									
計画配合(kg/m ³)									
セメント	混和材 1	混和材 2	水	細骨材 1	細骨材 2	粗骨材 1	粗骨材 2	混和剤 1	混和剤 2
C	F1	F2	W	S1	S2	G3	G2	Ad1	Ad2
305	—	—	164	295	552	973	—	3.05	—
水結合材比		53.7%			空気量		4.5%		
細骨材率		46.2%			粗骨材最大寸法		20mm		
呼び強度		27			強度指定材齢		28 日		
その他材料・配合に関する特記事項:									
<ul style="list-style-type: none"> ・セメントの種類：フライアッシュセメント B 種 ・化学混和剤の種類：高性能 AE 減水剤 ・粗骨材のアルカリシリカ反応性による区分：B 									
施工時期・養生条件など:									
(施工時期)									
・6月下旬～7月中旬									
(養生条件)									
<p>・温度解析結果に基づいて、コンクリート上面について打込み後 17 日間のシート養生を実施した。なお、保温養生材の撤去時にコンクリート表層部の温度が急降下することによって発生するひび割れを防止するため、養生材撤去時における表層部と外気温との温度差を 10℃以下として管理した。</p>									

構造物の概要・構造一般図など:

■ 構造物の概要

- ・構造形式:鉄筋コンクリート造(免震構造)
- ・基礎形式:直接基礎
- ・規模:地上3階
- ・最高の高さ:約16m

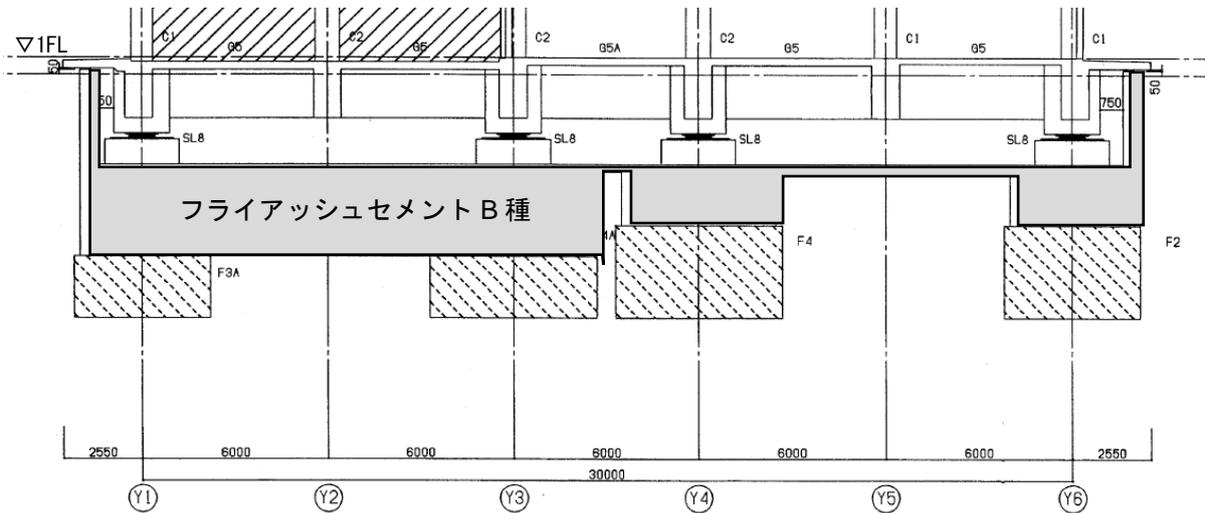


図 フライアッシュセメント B 種の使用範囲

産業副産物活用の効果:

- ・フライアッシュセメント B 種などの混合セメントによるアルカリシリカ反応抑制効果に期待するとともに、コンクリート中のアルカリ総量の規定を満足させることで、積極的な抑制対策とすることができる。
- ・セメント使用量を約 15%低減することができ、環境負荷低減に寄与することができる。
- ・長期的な強度増進や自己修復効果などを期待することができ、品質を向上させることができる。

産業副産物活用の課題, 改善点, 今後の展望など:

・構造物に大量に使用されるコンクリート材料に対して環境負荷低減を図る意義は大きく、発注者を含め業界全体として取り組むことが必要である。特にフライアッシュに関しては、北海道内で 40 箇所を超える生コン工場出荷体制が構築されていることに加え、全国的にも良質なフライアッシュが供給される環境下であり、地産地消の観点からも積極的な推進が望まれる。

参考文献:

- ・日本建築学会「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」2008 年
- ・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 年

記入者 伊藤組土建株式会社

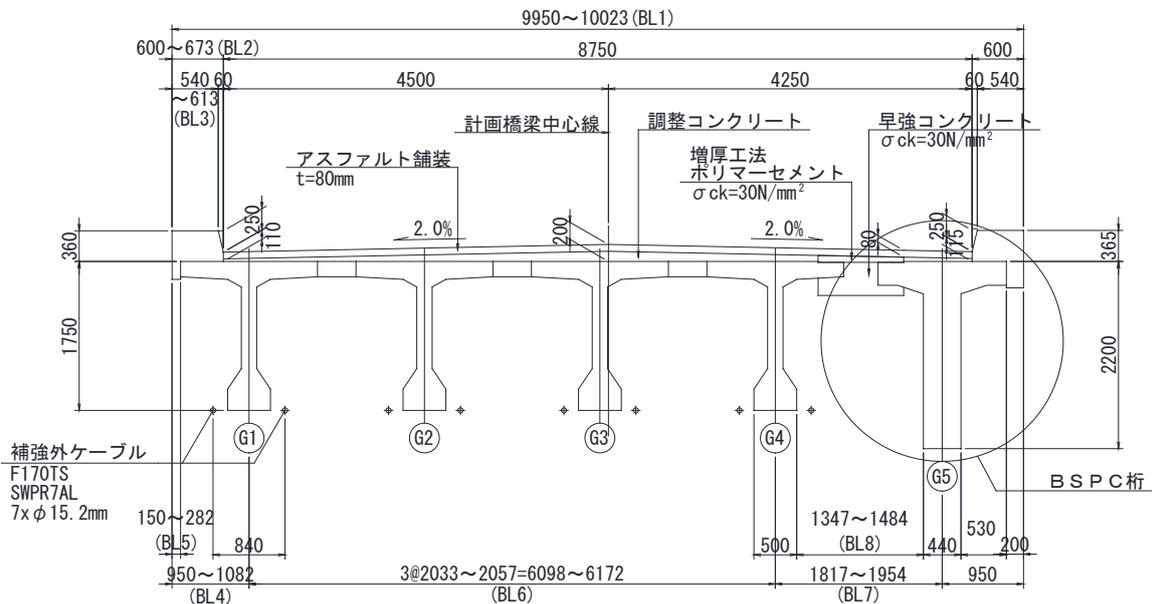
産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究委員会 産業副産物活用事例集								整理番号	
								2-1	
工事件名		一般国道 334 号 斜里町 日の出大橋上部工事							
発注者		北海道開発建設部 網走開発建設部							
構造物の種別		ポストテンションセグメント方式 PC 単純 T 桁橋							
産業副産物活用の目的:									
<ul style="list-style-type: none"> 道路橋示方書の塩害対策区分『S』に該当する橋梁であるため、塩害、凍害、ASR に対する耐久性の向上および環境負荷低減を目的に、『高炉スラグ微粉末』を PC 上部工に利用した。 									
配合設計のコンセプト:									
<ul style="list-style-type: none"> 普通セメントの 50%を『高炉スラグ微粉末 6000(cm²/g)』に質量置換する。BSPC 研究会の『高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性 PC 構造物』を参考に配合を決定した。 									
計画配合(kg/m ³)									
セメント	混和材 1	混和材 2	水	細骨材 1	細骨材 2	粗骨材 1	粗骨材 2	混和剤 1	混和剤 2
C	B1	B2	W	S1	S2	G1	G2	Ad1	Ad2
225	225	—	130	806	—	1037	—	2.25	—
水結合材比		28.9%			空気量		4.5±1.5%		
細骨材率		44.0%			粗骨材最大寸法		25mm		
呼び強度		50			強度指定材齢		28 日		
その他材料・配合に関する特記事項:									
<ul style="list-style-type: none"> 高炉スラグ微粉末の添加方針は、内割 50%の質量置換とした。 高性能 AE 減水剤(Ad1)使用:2.25% スランプ:15±2.5cm 									
施工時期・養生条件など:									
(製造時期)									
<ul style="list-style-type: none"> 平成 21 年 3 月～4 月 									
(養生条件)									
<ul style="list-style-type: none"> まず前養生として 20℃の恒温室中に 2 時間放置した後、脱型時強度を早期に発現させるため、蒸気による高温促進養生を 1 日実施した。温度上昇は 15℃/h 以下として、最高温度を 50±5℃として 6 時間以上保持した後、後養生として外気温まで徐々に降下させた。 									

構造物の概要・構造一般図など:

断面図

※ 拡幅工事であったため、
BSPC 桁は G5 桁のみ

標準部



産業副産物活用の効果:

<早強セメントの 50%を高炉スラグ微粉末 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ に置き換えた場合の効果(BSPC 研究会 HP より)>

- ・ 遮塩性の向上：供用期間 100 年後の予測塩化物イオン浸透深さ BSPC20mm，早強セメント 36mm
- ・ 凍結融解抵抗性の向上：組織を緻密化させ，水酸化カルシウム の溶脱を抑制する。
- ・ 耐アルカリ性の向上：①高炉スラグ微粉末の硬化に伴う『水酸化カルシウム の減少効果』
②コンクリート組織の緻密化による『アルカリイオンの移動速度の減少』
③単位セメント量減少による『アルカリ希釈効果』
- ・ 環境性の向上： CO_2 排出量を 49%削減

産業副産物活用の課題, 改善点, 今後の展望など:

製造側からの観点で見ると，高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を添加する場合は専用のサイロが必要になり，『設備制約』を受けるため，利用しにくい。また，混和材を使用しない製品に比べて製造単価も高くなる。今後は，『環境負荷低減』と，『高耐久性による構造物の長寿命化』を前面に押し出し，『発注時の仕様規定』に積極的に取り入れていくことが，産業副産物の利用促進に最も有効であると思われる。また，産業副産物の利用が少しずつでも増えることで，『設備制約』や『高い製造単価』も緩和され，産業副産物の更なる普及促進に繋がっていくものと思われる。

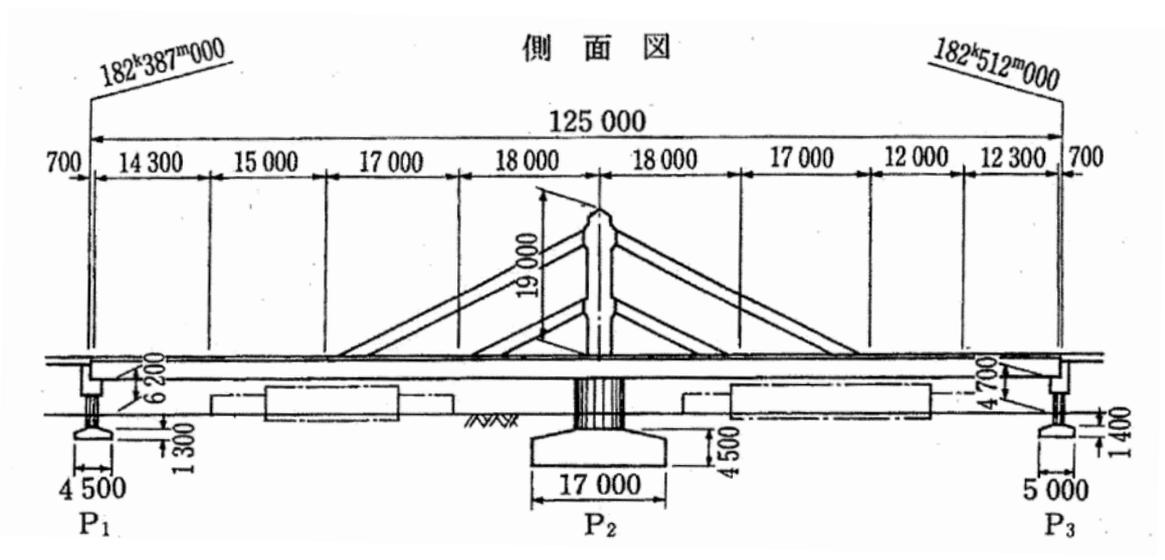
参考文献:

- ・高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性 PC 構造物(BSPC 研究会 URL : <http://bspc-study.com/>)

記入者 日本高圧コンクリート株式会社

産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究委員会 産業副産物活用事例集								整理番号 2-2	
工事件名		JR 根室線帯広駅連続立体交差事業 西3条南11丁目架道橋							
発注者		JR 北海道							
構造物の種別		鉄筋コンクリート橋脚基礎							
産業副産物活用の目的:									
<ul style="list-style-type: none"> 部材厚 4.5m, 総体積約 2000m³ となる鉄筋コンクリート橋脚基礎のコンクリート水和熱による温度ひび割れを抑制するため, 硬化時発熱量の少ない低発熱型特殊高炉セメント(日鉄住金セメント)を使用した. 									
配合設計のコンセプト:									
<ul style="list-style-type: none"> コンクリート硬化時発熱量の低減 									
計画配合(kg/m ³)									
セメント	混和材 1	混和材 2	水	細骨材 1	細骨材 2	粗骨材 1	粗骨材 2	混和剤 1	混和剤 2
C	F1	F2	W	S1	S2	G25	G40	Ad1	Ad2
330	—	—	132	652	—	742	494	3.63	—
水結合材比		40%			空気量		4.5±1.5%		
細骨材率		35%			粗骨材最大寸法		40mm		
呼び強度		27			強度指定材齢		28 日		
その他材料・配合に関する特記事項:									
<ul style="list-style-type: none"> 設計基準強度を満足した上で, 単位セメント量を少なくするために高性能 AE 減水剤(遅延型)を使用した. 									
施工時期・養生条件など:									
<ul style="list-style-type: none"> 施工時期は 1994 年秋, 湿潤養生 コンクリート打設は, 1 回打設, 2 回分割打設—中 3 日, および 3 回分割打設—中 5 日の 3 ケースについて温度ひび割れ発生を検討し, 3 回分割打設—中 3 日を採用した. フーチング上面にひび割れ防止の用心鉄筋を配置した. 									

構図物の概要・構造一般図など:



対象構造物 P2 中央橋脚基礎鉄筋コンクリート
 長さ 17m, 幅 27m, 高さ 4.5m 体積 1.919.7m³

産業副産物活用の効果:

・基礎コンクリート打設後、熱電対による温度計測、鉄筋計および有効応力計による測定を行ったが、測定値は解析値よりも小さく、温度ひび割れは確認されなかった。

産業副産物活用の課題, 改善点, 今後の展望など:

・産業副産物の質, 量ともに安定した供給の確立と活用効果の PR により活用が広がると考えられる。

参考文献:

小澤, 吉野, 菅野: 斜材・主げたともに PC 構造とした鉄道斜張橋の設計・施工, コンクリート工学, Vol.33, No.12, 1995.12

記入者 ジェイアール北海道エンジニアリング株式会社

資料9 フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末に関する文献集

積雪寒冷地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コンクリートに関する既往の文献を取りまとめた。

1. フライアッシュ

【ダム・電力】

- 1) 梅木信也, 南勲:かさ上げダムの調査および計画 新中野ダム, 土木技術, Vol.38, No.6, pp.15-18, pp.117-126, 1983.6
- 2) 新保彰, 小松昭男:美利河ダムにおける RCD 工法の試験施工, コンクリート工学, Vol.22, No.8, pp.24-32, 1984.8
- 3) 野田昭一, 鈴木一巳:奥沙流ダムの設計と施工について, ダム工学, No.15, pp.36-45, 1994.9
- 4) 石井清, 堤知明:水殿ダムサイトにおける大型供試体長期暴露試験結果, 大ダム, No.156, pp.29-42, 1996.7
- 5) 高山信紀, 土田茂, 前田哲宏, 鈴木世二:寒冷地におけるコンクリートダム堤体および供試体の長期測定結果について, 大ダム, No.175, pp.45-54, 2001.4
- 6) 佐藤賢次, 白戸伸明, 工藤雄一:スリップフォーム工法による貯炭サイロの施工, 電力土木, No.294, pp.39-43, 2001.7
- 7) 白戸伸明, 寺田卓雄, 渡部貢:北海道電力苫東厚真発電所4号機増設工事における貯炭サイロの施工, 建設の機械化, No.618, pp.12-18, 2001.8
- 8) 山元長裕樹, 阿部高, 木村淳二, 大井篤, 柴田勝博, 橋本学, 坂田昇:ダムコンクリートの耐凍害性向上対策について(奥胎内ダム工事報告), 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), Vol.68, VI-168, 2013.8
- 9) 遠藤勉, 池田裕樹, 江里口大輔:石狩湾新港発電所新設工事のうち土木工事の計画概要, 電力土木, No.378, pp.33-37, 2015.7

【橋梁構造物】

- 1) 高橋守人, 和田忠幸:白鳥大橋下部工の設計と施工, 土木技術, Vol.44, No.11, pp.25-32, 1989.11
- 2) 五十嵐浩行, 浜田純夫, 兼行啓治:橋梁用保温床板への石炭灰系軽量骨材コンクリートの適用性, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部, Vol.46, pp.198-199, 1991.9
- 3) 佐藤和徳, 今野敬二, 大森祐一, 遠藤雅司, 古川哲治, 大澤尚史:2020年の橋梁 1章 2020年の橋梁計画 東北地方整備局における新設橋梁の高耐久化の試行, 橋梁と基礎, Vol.49, No.8, pp.19-22, 2015.8
- 4) 榊原直樹, 工藤和信, 田中泰司, 子田康弘, 岩城一郎, 石田哲也:フライアッシュコンクリートを用いた高耐久床版の施工—国道283号釜石道路工事向定内橋(仮称)—, 橋梁と基礎, Vol.49, No.9, pp.25-30, 2015.9

- 5) 岩城一郎:これからの社会ニーズに応える構造工学 道路橋コンクリート床版の疲労問題解決を目指して, 土木学会誌, Vol.100, No.10, pp.18-19, 2015.10
- 6) 榊原直樹:復興道路・復興支援道路の全体像と現在【復興支援道路】高耐久フライアッシュコンクリート床版の施工—国道 283 号釜石道路工事向定内橋(仮称)—, 土木施工, Vol.57, No.5, pp.74-77, 2016.4
- 7) 加藤卓也, 岩城一郎, 戸川邦彦, 高橋功:凍結防止剤散布下における道路橋 PCaPC 床版の高耐久化に向けた研究, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.26, pp.549-554, 2017.10
- 8) 小林岳彦, 田中喜一郎, 出口哲義, 袋和雄, 亀田宏, 佐々木竜治:寒冷地高耐久 RC 床版に向けた施工実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), Vol.71, I-523, 2016.8
- 9) 田中実, 鈴木辰幸, 漆原新一, 中村定明, 橋爪博文, 岩城一郎:東北地方における橋梁の品質と耐久性確保への取り組み 高耐久仕様を適用した PC コンポ桁橋の施工—大沢第 3 橋—, 橋梁と基礎, Vol.51, No.2, pp.28-33, 2017.2
- 10) 宮下剛, 鈴木康宏, 皆田龍一, 立花幹雄, 後藤慎治:東北地方における橋梁の品質と耐久性確保への取り組み フライアッシュコンクリートを用いた高耐久床版の施工と品質向上の取り組み—浪板橋—, 橋梁と基礎, Vol.51, No.2, pp.34-39, 2017.2

【トンネル・地下構造物】

- 1) 藤野浩一, 鈴木功一:十勝川中流部を NATM で掘る 熊牛水力発電所導水路工事, トンネルと地下, Vol.17, No.6, pp.449-455, 1986.6
- 2) 入矢桂史郎, 三上哲司, 竹田宣典, 秋好賢治:幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究(III), 核燃料サイクル開発機構公開資料, pp.97, 2003.2
- 3) 中井雅司, 村田浩一, 堀川直毅:フライアッシュで坑内作業環境を改善—北海道電力 京極発電所放水路トンネル—, トンネルと地下, Vol.37, No.1, pp.43-54, 2006.1
- 4) 小西一寛, 中山雅, 三原守弘, 吉田泰, 入矢桂史郎, 秋好賢治, 納多勝:幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメントを用いた吹付けコンクリートの施工性に関する研究, 日本原子力研究開発機構 JAEA-Research, pp.59, 2006.6
- 5) 松田武, 納多勝, 入矢桂史郎, 小西一寛, 中山雅, 小林保之, 松田武, 納多勝, 入矢桂史郎, 小西一寛:幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメントの適用性に関する研究, 日本原子力研究開発機構 JAEA-Research, pp.152, 2008.7
- 6) 村崎慎一, 森俊介:中流動コンクリートの適用によるトンネル覆工の施工性改善と品質向上, 高速道路と自動車, Vol.53, No.12, pp.26-29, 2010.12
- 7) 中山雅, 佐藤治夫, 杉田裕, 野口聡:幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメント系材料の適用性—140m 調査坑道における原位置吹付け施工試験—, 日本原子力研究開発機構 JAEA-Research(Web), No.2010-055(WEB), 2011.
- 8) 種田昇, 斉藤道真, 小林文和, 小倉東:リサイクル材を有効活用した混和材を使用した高品質吹付けコンクリート, トンネル工学報告集, Vol.21, pp.51-58, 2011.11

- 9) 蒲雅志, 佐々木大輝, 永久和正, 柏原宏輔: 寒冷地における覆工コンクリートの高耐久化に向けた取り組み, 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), Vol.72, VI-160, 2017.8

【海洋構造物】

- 1) 藤田嘉夫, 武田均, 佐伯昇, 中津川ひろし: 汀線部コンクリートの凍害劣化挙動, 土木学会北海道支部論文報告集, No.46, pp.725-730, 1990.2
- 2) 桐生宏, 鮎田耕一, 桜井宏, 安藤輝夫, 木村伸之: 積雪寒冷地における海洋コンクリート構造物の耐凍害性向上について, 寒地技術論文・報告集, Vol.13, pp.231-236, 1997.11
- 3) 斉藤知秀, 内海博, 斉藤栄一, 福留和人: 石炭灰を大量に利用したコンクリートの寒冷地消波ブロックへの適用について, 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), Vol.57, VI-337, 2002.9
- 4) 清見博英, 田港朝之, 斉藤栄一, 石田勝久: 石炭灰を用いた海藻着生を促すための異形ブロック(藻礁ブロック)の施工, コンクリート工学, Vol.44, No.11, pp.22-28, 2006.11
- 5) 清田健, 本間義規, 東健一, 浅川典敬, 古屋温美, 長野章: 人工海底マウンド整備に係る外部コストの評価に関する一考察, 海洋開発論文集, Vol.23, pp.363-368, 2007.6
- 6) 清見博英, 田港朝之, 斉藤栄一, 宮内栄一, 坂本守: 石炭灰を利用した海藻着生のための異形ブロック(藻礁ブロック)の施工=再生資源による水生生物生育環境の創造=, 建設機械, Vol.43, No.7, pp.45-50, 2007.7

【舗装】

- 1) 松下啓郎, 桃井哲次, 横山正浩: フライアッシュを用いた転圧コンクリートによる路盤の施工例, 土木学会北海道支部論文報告集, No.45, pp.647-652, 1989.1
- 2) 石塚宗司, 宮越勇次, 横道雅己: RCD用コンクリートに関する一考察, 北海道開発局技術研究発表会発表概要集, Vol.33, pp.393-398, 1990.2
- 3) 石谷雅彦, 中丸貢, 笠原篤: 転圧コンクリート舗装の追跡調査, 道路建設, No.515, pp.64-69, 1990.12
- 4) 松尾栄治, 樋野和俊, 小林良太, 勝野誠: 細骨材のほとんどをフライアッシュに置換した転圧コンクリートの寒冷地における耐久性に関する一実験, Vol.JCI-C65, pp.245-248, 2005.6
- 5) 樋野和俊, 小林良太, 松尾栄治, 浜田純夫: 細骨材を石炭灰に全量置換した転圧コンクリートの表面性状と現場施工, 土木学会論文集, No.798, pp.41-49, 2005.9
- 6) 石田征男, 井坂幸俊, 上田宣人, 上野敦: 寒冷地での舗装用超硬練りコンクリートのスケーリング抵抗性に及ぼす気泡組織の影響に関する実験的研究, セメント技術大会講演要旨(CD-ROM), Vol.66, No.1217, 2012.4

【曝露試験】

- 1) 桜井宏, 鮎田耕一, 佐伯昇: 寒冷地海洋環境下に曝露されたコンクリートの表層部の劣化とその要因の検討, セメント技術年報, No.41, pp.379-382, 1987.12
- 2) 高柴保明, 太田利隆, 大橋猛: コンクリートの海岸暴露試験 20年経過したRCげたと各種補修材料について, 開発土木研究所月報, No.422, pp.1-10, 1988.7

- 3) 桜井宏, 鮎田耕一, 岡田包義, 宗広一徳: 寒冷地海洋環境下に曝露されたコンクリートの劣化のワ
イブル分布による検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部, Vol.44, pp.612-613, 1989.10
- 4) 鮎田耕一, 桜井宏, 日下陽一郎: 寒冷地海洋暴露コンクリートの剥離抵抗性評価, セメント技術大
会講演要旨, Vol.49, pp.780-785, 1995.4
- 5) 荻原淳平, 小野寺収(北海道電力): コンクリートの耐久性に関する研究 (中間報告) 自然条件下に
35年間曝露したコンクリートの耐凍害性, 北海道電力株式会社総合研究所研究報告, No.735, pp.35,
1998.3
- 6) 安田正雪, 阿部道彦, 千歩修, 小山智幸: フライアッシュを使用したコンクリートの屋外暴露試験,
コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.85-90, 2000.6
- 7) 佐藤大吾, 加藤利菜, 猪狩平三郎, 鮎田耕一: セメントの種類, 空気量と寒冷地に15年間暴露し
た海洋コンクリートのスケーリングとの関係, 寒地技術論文・報告集, Vol.20, pp.397-401, 2004.10
- 8) 稲吉淳, 梅津裕二, 高木えりさ, 清水昭之, 川西泰一郎: 中品質再生骨材コンクリート中の鉄筋腐
食に関する実験研究 その2 自然暴露試験結果(北海道暴露試験3年), 日本建築学会学術講演梗概集
A-1 材料施工, Vol.2006, pp.625-626, 2006.7
- 9) 渡邊晋也, 迫田恵三, 上野信平, 丸章夫, 吉居智司: 熱帯域の海中に暴露した各種コンクリートの
耐久性, 東海大学海洋研究所研究報告, No.28, pp.55-64, 2007.3
- 10) 安田正雪, 阿部道彦, 千歩修, 小山智幸: 10年屋外暴露したフライアッシュを使用したコンクリ
ートの性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.777-782, 2007.7
- 11) 佐藤重悦, 徳重英信: 廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタル供試体の長期暴露性状, コンク
リート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1810-1815, 2014.6
- 12) 齋藤敏樹, 関谷美智, 開洋介: フライアッシュコンクリートの室内試験および曝露試験による耐久
性について, コンクリート工学年次論文集(CD-ROM), Vol.39, No.1, pp.181-186, 2017.6
- 13) 石川嘉崇, 細川佳史, 林建佑, 曾我亮太: 異なる環境に暴露されたフライアッシュコンクリートの
ポゾラン反応に関する評価, 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), Vol.72, V-367, 2017.8
- 14) 開洋介, 関谷美智, 齋藤敏樹: 10年間曝露したフライアッシュコンクリートの耐久性について, 土
木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), Vol.72, V-369, 2017.8

【基礎研究】

- 1) 磯野克由, 鮎田耕一, 林正道: 寒冷地におけるコンクリートの強度発現性状, 土木学会年次学術講
演会講演概要集 第5部, Vol.42, pp.328-329, 1987.9
- 2) 稲田徹也, 角所伸治, 犬塚雅生, 高橋徹, 勝世敬一, 長野伸泰: 道内産砕石のアルカリシリカ反応
性と混和材の添加効果, 土木学会北海道支部論文報告集, No.46, pp.709-714, 1990.2
- 3) 庄谷征美, 杉田修一, 月永洋一, 青木秀敏: 寒冷地コンクリート構造物の耐久性評価手法に関する
研究, 八戸工業大学紀要, Vol.10, pp.104-113, 1991.2
- 4) 小林仁, 齋藤敏樹: 海外炭フライアッシュのコンクリートへの適用 (その1), 電力土木, No.282,
pp.52-56, 1999.7
- 5) 岩城一郎, 三浦尚, 熊谷徹: 寒冷地における石炭灰を多量に混和したコンクリートの強度発現性,
土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部, Vol.54, pp.1050-1051, 1999.8

- 6) 杉山雅：積雪寒冷地域における災害に強い都市環境モジュールの開発とシステム構築～特に建築・建造物の耐震性向上と耐震性診断および新資材の開発に関する研究～新気泡剤を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究～凍結融解作用によるコンクリート強度の低下および劣化を防止し、躯体コンクリート強度の信頼性の向上を図る～、積雪寒冷地域における災害に強い都市環境モジュールの開発とシステム構築 平成 10 年度 研究成果報告書(北海学園大学学術フロンティア推進事業), pp.4.1-4.10, 1999
- 7) 杉山雅：気泡作用を応用したフライアッシュコンクリートの耐凍結融解抵抗性, 積雪寒冷地域における災害に強い都市環境モジュールの開発とシステム構築 平成 11 年度 研究成果報告書(北海学園大学学術フロンティア推進事業), pp.40-45, 2000
- 8) 北海道寒地住宅都市研：フライアッシュのコンクリート構造物への適応に関する研究 (北海道立寒地住宅都市研究所 S), 寒地住宅都市研究所年報, Vol.2000, pp.157-158, 2001.4
- 9) 中井雅司, 林透, 斎藤敏樹：フライアッシュコンクリートの中性化に関する研究, 電力土木, No.293, pp.74-78, 2001.5
- 10) 小林仁, 角谷英一郎, 斎藤敏樹：海外炭フライアッシュのコンクリートへの適用 その 2, 電力土木, No.301, pp.66-70, 2002.9
- 11) 杉山隆文, 辻幸和：電気泳動試験による高強度フライアッシュ人工骨材(HFA 骨材)コンクリートの塩分浸透評価, 材料, Vol.52, No.2, pp.198-203, 2003.2
- 12) 山城洋一, 笠井秀男, 斎藤敏樹：フライアッシュコンクリートの初期強度低下対策, 電力土木, No.319, pp.98-102, 2005.9
- 13) 寺村直子, 大沼博志, 黒島美男：寒冷地環境におけるエポキシ樹脂ひび割れ注入材の接着強度特性について, 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), Vol.62, 5-248, 2007.9
- 14) 谷口円, 桂修, 濱幸雄, 佐川孝広, 小倉東：自己修復コンクリートの実用化, 北海道立北方建築総合研究所調査研究報告集(CD-ROM), Vol.2008, 2009.5
- 15) 高橋正樹, 五十嵐由一：保守管理 フライアッシュを使用した簡易補修材の試験施工と経過報告, 電力土木, No.374, pp.28-31, 2014.11

【その他】

- 1) 田中弘文：石炭灰有効利用の最近の状況, 化学と工業, Vol.37, No.12, pp.849-851, 1984.12
- 2) 沢好博：石炭灰の有効利用拡大・促進に向けて, CCTJ, Vol.8, pp.29-32, 2003.10
- 3) 阿部勉：フライアッシュの有効利用について, 月刊コンクリートテクノ, Vol.32, No.12, pp.17-20, 2013.12
- 4) 矢島典明：産業副産物起源のコンクリート用混和材の有効利用—課題と展望—/3.コンクリート用混和材としての現状 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
- 5) 田中敏嗣：産業副産物起源のコンクリート用混和材の有効利用—課題と展望—/6.適用状況と今後の課題・展望 廃棄物・副産物のセメント製造における使用とコンクリート用混和材の有効利用における課題, コンクリート工学, Vol.52, No.5, pp.476-479, 2014.5

- 6) 杉山隆文, 井上真澄, 小野寺収, 澤村秀治: コンクリートと異分野との融合/3.産業副産物・未利用資源を用いたコンクリート 積雪寒冷地におけるコンクリート用混和材としての高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの利用, コンクリート工学, Vol.54, No.9, pp.907-913, 2016.9
- 7) 佐々木憲昭, 佐々木憲昭: 能代山本生コン協組における FA コン出荷の取り組み, 月刊コンクリートテクノ, Vol.35, No.11, pp.27-33, 2016.11

2. 高炉スラグ微粉末

【海洋構造物・曝露試験】

- 1) 藤田嘉夫, 武田均, 佐伯昇, 中津川ひろし: 汀線部コンクリートの凍害劣化挙動, 土木学会北海道支部論文報告集, No.46, pp.725-730, 1990.2
- 2) 鮎田耕一, 桜井宏, 斉藤爾, 安藤輝夫, 木村伸之: 積雪寒冷地の海岸・港湾コンクリート構造物の剥離抵抗性評価, 寒地技術論文・報告集, Vol.11, pp.74-78, 1995.11
- 3) 桐生宏, 鮎田耕一, 桜井宏, 安藤輝夫, 木村伸之: 積雪寒冷地における海洋コンクリート構造物の耐凍害性向上について, 寒地技術論文・報告集, Vol.13, pp.231-236, 1997.11
- 4) 鮎田耕一, 桜井宏, 日下陽一郎: 寒冷地海洋暴露コンクリートの剥離抵抗性評価, セメント技術大会講演要旨, Vol.49, pp.780-785, 1995.4
- 5) 加藤利菜, 鮎田耕一, 猪狩平三郎: 15年間寒冷地の海上大気中に暴露したコンクリートの表面剥離性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.975-980, 2004.6
- 6) 加藤利菜, 鮎田耕一, 猪狩平三郎, 佐藤大吾: 寒冷地における海洋コンクリートの表面剥離に及ぼす気象条件と使用材料の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.751-756, 2005.6
- 7) 渡邊晋也, 迫田恵三, 上野信平, 丸章夫, 吉居智司: 熱帯域の海中に暴露した各種コンクリートの耐久性, 東海大学海洋研究所研究報告, No.28, pp.55-64, 2007.3
- 8) 吉田行, 田口史雄, 村中智幸, 尾形寿, 小倉東, 佐竹比呂志: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート工場製品の実環境下での性能評価について, 寒地土木研究所月報, No.690, pp.2-14, 2010.11
- 9) 佐藤重悦, 徳重英信: 廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタル供試体の長期曝露性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1810-1815, 2014.6
- 10) 吉田行, 渡辺淳, 渡辺尚宏: 積雪寒冷環境下に暴露された改質セメント・コンクリート製品の耐久性評価, 寒地土木研究所月報, No.743, pp.28-34, 2015.4

【プレキャスト製品】

- 1) 吉田行, 田口史雄, 名和豊春, 渡辺宏: 耐久性向上対策として高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの工場製品への適用性, 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), Vol.64, V-299, 2009.8
- 2) 吉田行, 尾形寿, 村中智幸, 小倉東, 佐竹比呂志: 室内試験による混和材を用いた高耐久性コンクリートの工場製品への適用性評価, 寒地土木研究所月報, No.680, pp.12-20, 2010.1
- 3) 和田晃一, 佐藤隼人, 坂口守: 国道13号野黒沢高架橋床版工工事の施工報告, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.24, pp.391-394, 2015.10

- 4) 杉田篤彦, 二井谷教治, 綾野克紀, 藤井隆史: 超高耐久プレストレストコンクリート部材の実験的研究, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.24, pp.747-752, 2015.10
- 5) 綾野克紀, 二井谷教治, 細谷多慶, 高橋克則: PC 構造物における産業副産物の有効活用 高炉スラグ細骨材を用いたプレキャスト部材の研究開発, プレストレストコンクリート, Vol.59, No.6, pp.80-85, 2017.11

【基礎研究】

- 1) 大橋猛, 中井俊英, 小長井宣生: アルカリ骨材反応に影響を及ぼす諸要因について, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部, Vol.41, pp.613-614, 1986.11
- 2) 三浦尚, 黒川聡, 岸真裕: 寒冷地における高炉スラグ微粉末コンクリートの施工性に関する研究, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, Vol.1988, pp.432-433, 1989.3
- 3) 稲田徹也, 角所伸治, 犬塚雅生, 高橋徹, 勝世敬一, 長野伸泰: 道内産砕石のアルカリシリカ反応性と混和材の添加効果, 土木学会北海道支部論文報告集, No.46, pp.709-714, 1990.2
- 4) 三浦尚, 板橋洋房, 遠藤正文: 寒冷地における高炉スラグ微粉末コンクリートの養生方法に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.44, pp.170-173, 1990.12
- 5) 庄谷征美, 杉田修一, 月永洋一, 青木秀敏: 寒冷地コンクリート構造物の耐久性評価手法に関する研究, 八戸工業大学紀要, Vol.10, pp.104-113, 1991.2
- 6) 堀宗朗, 三浦尚, 佐野功: 凍結防止剤がアルカリ骨材反応に及ぼす影響の基礎的研究, セメント技術大会講演要旨, Vol.46, pp.580-585, 1992.4
- 7) 須藤裕司, 鮎田耕一, 早川和良, 山川勉: メチルセルローズ系増粘剤を用いたコンクリートの耐凍害性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.887-892, 1993.6
- 8) 三浦尚, 盛岡義郎, 千葉武生: 寒冷地における高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの養生方法に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.48, pp.850-855, 1994.12
- 9) 日向哲朗, 三浦尚, 鈴木一利: 寒冷地における高流動コンクリートの強度発現に関する基礎的研究, セメント技術大会講演要旨, Vol.50, pp.232-233, 1996.4
- 10) 北辻政文, 藤居宏一: 寒冷地コンクリートへの高炉スラグ微粉末の利用に関する研究, 農業土木学会論文集, No.184 Page.613-619, 1996.8
- 11) 鈴木一利, 岩城一郎, 三浦尚: 寒冷地における高炉スラグ微粉末混和コンクリートの強度発現, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.247-252, 1997.6
- 12) 鈴木一利, 岩城一郎, 三浦尚: 寒冷地における養生温度の上昇が高炉スラグ微粉末混和コンクリートの強度発現に及ぼす影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部, Vol.52, pp.174-175, 1997.9
- 13) 七海隆之, 鮎田耕一, 山川勉: 水中不分離性コンクリートの耐凍害性向上に関する一考察, セメント技術大会講演要旨, Vol.53, pp.212-213, 1999.4
- 14) 岩城一郎, 沢井洋介, 三浦尚: 高炉スラグ混和コンクリートの強度発現に及ぼす配合および温度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.127-132, 2000.6
- 15) 岩城一郎, 三浦尚: 寒冷地における高炉スラグ微粉末混和と高流動コンクリートの強度発現性に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.655, pp.97-106, 2000.8

- 16) 岩城一郎, 三浦尚, 関紀宏: 打込み直後に低温にさらされた高炉スラグ微粉末混和コンクリートの強度発現性, セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.252-257, 2001.2
- 17) 岩城一郎, 沢井洋介, 三浦尚, 梶谷浩和: 寒冷地において使用される高炉スラグ微粉末混和コンクリートの強度発現性に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.12, No.2, pp.41-49, 2001.5
- 18) 宮田佳和, 大島義信, 服部篤史, 河野広隆: ASR に対して無害でない砕石粉の高炉スラグによる ASR 膨張抑制に関する研究, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), Vol.2009, V-40, 2009.5
- 19) 種田昇, 斉藤道真, 小林文和, 小倉東: リサイクル材を有効活用した混和材を使用した高品質吹付けコンクリート, トンネル工学報告集, Vol.21, pp.51-58, 2011.11
- 20) 久保善司, 中田正文, 森寛晃, 久我龍一: 凍結防止剤によるコンクリート劣化現象の実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.634-639, 2012.6
- 21) 橋本勝文, 横田弘: 凍害環境下におけるセメント水和固化体の細孔構造および塩化物イオン固定化特性, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, pp.460-465, 2013.2
- 22) 井上真澄, 森将, 岡田包儀: 有機短繊維と高炉スラグ微粉末がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, pp.393-398, 2014.2

【その他】

- 1) 堀口敬: 高炉スラグ微粉末の RCD 工法と日本一美しい河川 札内川ダム, 土木学会誌, Vol.80, No.2, pp.6-9, 1995.2
- 2) 鈴木英一: 北海道開発局ダム技術 50 年のあゆみ, ダム技術, No.200, pp.77-87, 2003.5
- 3) 名和豊春, 吉田行: 北の大地に見る次代の技術—初ものづくり"北海道"—現在期 世界基準の技術基地—3 高炉スラグと合体したビーライト系セメント—北海道発世界基準の高強度・高耐久性コンクリート用セメントの開発—, 土木学会誌, Vol.92, No.1, pp.31-32, 2007.1
- 4) 日鐵セメント 技研: セメコン未来研究所 セメントメーカーの技術開発—最前線 日鐵セメント(株) 技術部研究所, セメント・コンクリート, No.762, pp.3-7, 2010.8
- 5) 新村亮, 竹田宣典, 小野栄: 建設施工の地球温暖化対策, 環境対策低炭素型のコンクリートの各種構造物への適用クリーンコンクリート, 建設の施工企画, No.754, pp.37-42, 2012.12
- 6) 檀康弘: 産業副産物起源のコンクリート用混和材の有効利用—課題と展望—/3.コンクリート用混和材としての現状 高炉スラグ微粉末, コンクリート工学, Vol.52, No.5, pp.387-392, 2014.5
- 7) 田中敏嗣: 産業副産物起源のコンクリート用混和材の有効利用—課題と展望—/6.適用状況と今後の課題・展望 廃棄物・副産物のセメント製造における使用とコンクリート用混和材の有効利用における課題, コンクリート工学, Vol.52, No.5, pp.476-479, 2014.5
- 8) 杉山隆文, 井上真澄, 小野寺収, 澤村秀治: コンクリートと異分野との融合/3.産業副産物・未利用資源を用いたコンクリート 積雪寒冷地におけるコンクリート用混和材としての高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの利用, コンクリート工学, Vol.54, No.9, pp.907-913, 2016.9

資料 10 委員会で実施したアンケート

第 1 回

産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究委員会

WG2 のアンケート調査

近年、産業副産物起源の材料が環境負荷低減を目的に、コンクリート用混和材として着目されています。主要材料に JIS 化された高炉スラグ微粉末やフライアッシュがあります。これら材料の技術的状況では環境負荷低減だけでなく、コンクリートの耐久性確保、ひび割れ防止、施工性向上など、品質を改善し、より要求性能に合致したコンクリート（製品）の提供が可能で、北海道内でも利用されています。しかし、社会的状況では積極的な利活用には繋がっていません。

これには、技術面および社会面の両者を合わせた、状況改善が必要であると考えます。

改善するに当たり、様々な場面での問題が考えられます。そこで、産業副産物起源のコンクリート用混和材の利用状況についてアンケート調査し、問題点を洗い出すことになりました。結果は本委員会のみで活用し、外部に公開することは考えていません。ご協力をお願い致します。

機関・会社名

業種

[一般項目]

Q1「これまでに産業副産物起源の混和材を使用したことがありますか？」

(回答) 1)ある 2)ない……ないと回答した方は Q5 まで飛ぶ。

Q2 Q1で「ある」と回答したかたにお聞きします「それは JIS 化された混和材ですか？それは何ですか？」

(回答) 1.JIS ・ 非 JIS

2.JIS ・ 非 JIS

3.JIS ・ 非 JIS

4.JIS ・ 非 JIS

Q3 Q2 を記載した方にお聞きします「どのような場面で使用しましたか？」(差支えの無い範囲で構いません。できれば寒冷地での使用の有無、基準やガイドライン、設計強度の記載をお願いします。)

(回答)

使用した基準やガイドライン:

Q4 Q2.3 を記載した方にお聞きます「それほどの様な目的・提案で使用しましたか？」(複数回答可)

(回答) 1. 1)コスト面 2)施工性 3)仕上り品質面 4)その他(具体的に)

2. 1)コスト面 2)施工性 3)仕上り品質面 4)その他(具体的に)

3. 1)コスト面 2)施工性 3)仕上り品質面 4)その他(具体的に)

4. 1)コスト面 2)施工性 3)仕上り品質面 4)その他(具体的に)

Q5「当事者ではないが産業副産物起源のコンクリート混和材を寒冷地で使用した物件・事例をご存じですか？」

(回答) _____

Q6「産業副産物起源のコンクリート混和材を普及させたいが、上手くない。」と言われますが、どう思われますか？

(回答) 1)そう思う 2)そう思わない 3)分からない

Q7 Q6 で「そう思う」とお答えした方にお聞きます。「それは何故だと思いますか？」(具体的に)

(回答) _____

[使用項目]

Q8「これまで産業副産物起源のコンクリート混和材を使用して、または、使用を検討して問題や不安になった点」を列挙してください。

(回答) _____

Q9「産業副産物起源のコンクリート混和材が JIS 規格を外れていても、使用場所や用途によっては既存の施工技術で充分利用可能である。」と思いますか？

(回答) 1) そう思う 2) そう思わない 3) 分からない

Q10「JIS 規格を外れた産業副産物起源のコンクリート混和材を使って、ユーザーの望む生コンクリートやコンクリート製品を製造・施工するノウハウを作業員がもっている。」と思いますか？

(回答) 1) そう思う 2) そう思わない 3) 分からない

Q11 その他ご意見がありましたら、自由に記載して下さい。

(回答) _____

アンケート調査にご協力頂きまして、ありがとうございました。

第2回

産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究委員会 産業副産物活用事例調査票

<記入者の調査>

職種：行政機関 総合建設業 建設コンサルタント コンクリート製品製造 生コン製造業
セメントメーカー 電力会社 土木資材代理店 サービス業 公的研究機関 教育機関

日常業務：計画 設計 施工 維持管理 製造 研究 その他()

<フライアッシュに関する調査>

ここでは主に JIS 規定 フライアッシュ II 種の利用状況について、お聞きしていきます。

それ以外の場合は下記選択肢にチェック, または○を付けてください。

(JIS 外 JIS I 種 JIS III 種 JIS IV 種 フライアッシュセメント: A 種 B 種 C 種)

1. 積雪寒冷地での使用実績 / 研究実績について

Q1-1: フライアッシュを使用/研究する事になった目的を可能な範囲で記載してください。

A1-1: 例えば 周辺環境的側面 ・ 現場環境側面 ・ 技術的側面 ・ 仕様書指定 より・・・。

Q1-2: 積雪寒冷地でフライアッシュを採用/研究対象とした場面はどこですか?(できれば土木系)

A1-2: 一つ回答

橋梁構造物…… 上部構造 下部構造 その他()

ダム構造物…… ダム堤体 監査廊 のり面保護 その他()

道路構造物…… のり面保護 トンネル その他()

港湾構造物…… 岸壁 堤防 その他外郭施設() その他

その他 ・ 建築系も可()

可能であれば、現場名 () 道・県, 現場・工事名: ()

2. 材料品質について

Q2-1： JIS で規格されたフライアッシュを使用/研究するにあたり、品質について考慮した項目は何ですか？。（フライアッシュセメント利用の場合は「その他考慮した品質」に記載してください。）

A2-1： 複数の回答可

- 考慮していない 品質変動 プレーン比表面積 活性度指数 フロー値比 強熱減量
- メチレンブルー吸着量

その他の考慮した品質

3. 積雪寒冷地での配合について

Q3-1： フライアッシュの使用を設計/研究に取り入れた時に、着目した項目は何ですか？。

A3-1： 複数の回答可

- 特に着目していない 強度発現性 初期凍害 凍害 空気連行性 遮塩性 外観
- 運搬 圧送 収縮特性 自己治癒性 長期強度発現性 水和熱 ワークアビリティ
- 粘性 ひびわれ 水密性 クリープ 摩耗特性 耐酸性 化学的腐食(酸を除く)
- ASR 抑制

その他

Q3-2：最終のフライアッシュコンクリートの製造場所、配合及び養生方法を教えてください。

A3-2：可能な限り詳細をお願いします。

● 製造場所について

生コン工場 現場仮設プラント 製品工場 その他（ ）

● 設計強度と管理日数について

3日 7日 14日 28日 91日 その他（ 日）

〔設計強度：18～24N/mm² 24～40N/mm² 240～60N/mm² 260N/mm²以上

〔呼び強度：18 21 24 27 30 33 36 40 42 45 50 55 60

● 混和材としてのフライアッシュの使用について

〔フライアッシュ（ ）種：普通+FA 早強+FA その他（ ）
フライアッシュセメントとして使用（A種・B種・C種）

〔W/C・W/(C+フライアッシュ)比
〔25%以下 25～35% 35～45% 45～55% 55%以上

● フライアッシュ添加の考え方について（フライアッシュセメントの場合は本問いを無視）

〔考え方：内割り 外割り 内外中間割り
使用量：1m³に 10kg/m³ 15 kg/m³ 20kg/m³ 25kg/m³ その他（ kg/m³）
：セメントの（体積・質量）置換で10% 15% 20% 25% 30% その他（ %）

その他使用量・・・骨材に対して（ ）
細骨材に対して（ ）
粗骨材に対して（ ）

● 養生方法について

A 散水、B 湿布、C 封緘、D 養生剤（被膜剤）、E 給熱、F 断熱、G 標準、H 常圧蒸気、I その他（ ）
（ を ）日 + （ を ）日 + （ を ）日 + （ を ）日実施
脱型は材齢（ ）日

施工時期/施工時期の想定：1月2月3月4月5月6月7月8月9月10月11月12月

4. 施工時・施工後のフライアッシュコンクリートの状況について

Q4-1：フライアッシュを採用/研究した時、施工時やその後に何か副値的な成果としてのメリットがありましたか？

A4-1：複数の回答可。また、詳細な記述も可能な範囲でお願いします。

ない 減水性改善 流動性改善 充填性改善 材料分離抵抗性改善 乾燥収縮抑制 ・

温度ひび割れ抑制 遮塩性改善 ASR 長期強度発現性 コンクリート表面の肌理 色 ・

環境問題の改善 その他()

[可能な範囲で詳しく記載してください。]

Q4-2: フライアッシュを採用/研究した時、施工時やその後（経過観察）に問題や課題はありましたか？

A4-2: 複数の回答可。また、詳細な記述もお願いします。

ない 強度発現性 凍害空気連行性 遮塩性 外観 収縮性能 長期強度発現性 ・

水和熱 ワーカビリティ 粘性 ひびわれ 水密性 クリープ 摩耗特性 ・

減水剤使用量 AE 剤使用量 その他（ ）

[可能な範囲で詳しく記載してください。]

<高炉スラグ微粉末に関する調査>

ここでは主に JIS 規定 高炉スラグ微粉末の利用状況について、お聞きしていきます。
高炉セメントしか利用した事がない場合は下記にチェック, または○を付けてください。

(高炉セメント: A種、B種、C種)

1. 積雪寒冷地での使用実績について

Q1-1: 高炉スラグ微粉末 (高炉セメント) を使用/研究する事になった目的を可能な範囲で記載してください。

A1-1: 例えば 周辺環境的側面 ・ 現場環境側面 ・ 技術的側面 ・ 仕様書指定 より・・・。

Q1-2 : 積雪寒冷地で高炉スラグ微粉末 (高炉セメント) を採用/研究対象とした場面はどこですか?
(できれば土木系)

A1-2 : 一つ回答

橋梁構造物…… 上部構造 下部構造 その他()

ダム構造物…… ダム堤体 監査廊 のり面保護 その他()

道路構造物…… のり面保護 トンネル その他()

港湾構造物…… 岸壁 堤防 その他外郭施設() その他()

その他・建築系も可 ()

可能であれば、現場名 () 道・県 , 現場・工事名: ()

2. 材料品質について

Q2-1: JIS で規格された高炉スラグ微粉末を使用/研究するにあたり、品質について考慮した項目は何ですか?。(高炉セメント利用の場合は「その他考慮した品質」に記載してください。)

A2-1: 複数の回答可

考慮していない 品質変動 ブレン比表面積 活性度指数 石膏添加量 強熱減量

その他の配慮した品質

3. 積雪寒冷地での配合について

Q3-1 : 高炉スラグ微粉末 (高炉セメント) の使用を設計/研究に取り入れた時、着目した項目は何ですか?。

A3-1: 複数の回答可

特に着目していない 強度発現性 初期凍害 凍害 空気連行性 遮塩性 外観

運搬 圧送 収縮特性 長期強度発現性 水和熱 ワーカビリティ 粘性 ひびわれ

水密性 クリープ 摩耗特性 耐酸性 化学的腐食(酸を除く) ASR 抑制

その他

Q3-2 :最終の高炉スラグ微粉末(高炉セメント)を用いたコンクリートの製造場所、配合及び養生法を教えてください。

A3-2. 可能な限り詳細にお願いします。

● 製造場所について

生コン工場 現場仮設プラント 製品工場 その他()

● 設計強度と管理日数について

3日 7日 14日 28日 91日 その他(日)

設計強度: 18~24N/mm² 24~40N/mm² 40~60N/mm² 60N/mm²以上

呼び強度: 18 21 24 27 30 33 36 40 42 45 50 55 60

● 混和剤としての高炉スラグ微粉末の使用について

ブレン値(): 普通+BF 早強+BF その他()
高炉セメントとして使用 (A種・B種・C種)

W/C・W/(G+高炉スラグ微粉末) 比
25%以下 25~35% 35~45% 45~55% 55%以上

● 高炉スラグ微粉末の添加の考え方について(高炉セメントの場合は本問いを無視)

考え方: 内割り 外割り 内外中間割り
使用量: 1m³に 10kg/m³ 15 kg/m³ 20kg/m³ 25kg/m³ 50kg/m³ その他(kg/m³)
:セメントの(体積・質量)置換で10% 15% 20% 25% 50% その他(%)

その他使用量・・・骨材に対して ()
細骨材に対して ()
粗骨材に対して ()

● 養生方法について

A 散水、B 湿布、C 封緘、D 養生剤(被膜剤)、E 給熱、F 断熱、G 標準、H 常圧蒸気、I その他()
(を)日 + (を)日 + (を)日 + (を)日実施
脱型は材齢 () 日

施工時期/施工時期の想定: 1月2月3月4月5月6月7月8月9月10月11月12月

4. 施工時・施工後の高炉スラグ微粉末（高炉セメント）を利用したコンクリートの状況について

Q4-1：高炉スラグ微粉末（高炉セメント）を採用/研究した時、施工時やその後に何か副値的な成果としてのメリットがありましたか？

A4-1：複数の回答可。また、詳細な記述の可能な範囲でお願いします。

ない 減水性改善 流動性改善 充填性改善 材料分離抵抗性改善 乾燥収縮抑制

温度ひび割れ抑制 遮塩性改善 ASR 長期強度発現性 コンクリート表面の肌理 色

環境問題の改善 その他()

[可能な範囲で詳しく記載してください]

Q4-2：高炉スラグ微粉末（高炉セメント）を採用/研究した時、施工時やその後（経過観察）に問題や課題はありましたか？

A4-2：複数の回答可。また、詳細な記述もお願いします。

ない 強度発現性 凍害 空気連行性 遮塩性 外観 収縮性能 長期強度発現性・

水和熱 ワーカビリティ 粘性 ひびわれ 水密性 クリープ 摩耗特性・

減水剤使用量 AE 剤使用量 その他()

[可能な範囲で詳しく記載してください]

ご協力、ありがとうございました。

北海道土木技術会コンクリート研究委員会資料 第 161 号

産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地
利用技術研究小委員会 報告書

- 発行日 : 平成 30 年 6 月
- 編 著 : 北海道土木技術会コンクリート研究委員会
産業副産物起源のコンクリート用混和材に関する積雪寒冷地利用技術研究小委員会
- 発 行 : 北海道土木技術会コンクリート研究委員会
ISBN 978-4-938676-61-2C3051
- 事務局 : ㈱ドーコン 構造部内
札幌市厚別区厚別中央 1 条 5 丁目 4-1 TEL(011)801-1540 FAX(011)801-1541
- 印 刷 : ㈱HRC 研究所
- ご注意 : 当該出版物の内容を複製したり、他の出版物へ転載する場合には、
必ず北海道土木技術会コンクリート研究委員会の許可を得て下さい
-