

鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用

(2 0 2 4 年 版)

鉄 鋼 ス ラ グ 協 会

はじめに

鉄鋼生産の副産物である高炉スラグはさまざまな用途に使用されていますが、最大の用途は、高炉セメントです。高炉セメントは、普通セメントと高炉スラグ微粉末を混合して生産されます。

わが国の高炉セメントは製造開始以来 100 年以上の歴史があります。1970 年代のオイルショック、1980 年代のコンクリートの耐久性問題および 1990 年代から顕在化した地球温暖化問題の中で、高炉セメントはその特性が認められ、需要が急増し国内セメント需要の 20 ～ 25% を占めるまでになりました。この間に、高炉セメントを使用した構造物には、関門鉄道トンネル（1942 年完工）、国立霞ヶ丘競技場（1958 年完工、2015 年解体）さらには、東京スカイツリータウン（2012 年完工）、国立競技場（2019 年完工）、東京オリンピック・パラリンピック選手村宿泊棟（2019 年完工）、エスコンフィールド北海道（2023 年完工）など、数多くの構造物に使用されてきました。

高炉セメントは、普通セメントに比べ製造時の二酸化炭素排出量が少ないことや省資源・省エネルギーに寄与することから、2001 年にグリーン購入法の特定調達品目の指定を受けました。2016 年 5 月に閣議決定された日本の 2030 年度温室効果ガス削減目標（2013 年度比▲26.0%）の地球温暖化対策計画には、「非エネルギー起源二酸化炭素」の削減施策として「混合セメントの利用拡大」が織り込まれており、国としてその利用促進が図られています。一方で、国際的にも新たな成長戦略として気候変動への取り組みは加速しており、2020 年 12 月の G20 サミットで日本政府は、温室効果ガスの排出を 2050 年までに実質ゼロにするとして脱炭素社会を実現することを宣言しました。

これを受け 2021 年 10 月に閣議決定された日本の 2030 年度温室効果ガス削減目標（2013 年度比▲46.0%）の地球温暖化対策計画には、「非エネルギー起源二酸化炭素」の削減施策として「混合セメントの利用拡大」が織り込まれており、国としてその利用促進が図られています。

国土交通省グリーン社会実現推進本部では高炉セメントは二酸化炭素削減効果の大きいセメントとしてその利用拡大が期待されており、さらに高炉スラグの比率を高めた低炭素コンクリートの活用が国土交通省で検討されています。このような中、日本建築学会では 2022 年、鉄筋コンクリート工事に関わる社会情勢の変化、特に環境負荷低減を含む SDGs に配慮するため、鉄筋コンクリート工事の標準仕様書である「JASS5」が大改訂され、環境性が規定されました。

改定された JASS5 並びに、既刊の土木学会「コンクリート標準示方書」、「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針」および「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案）」にも示されているように、高炉セメント使用の効果を得るには、コンクリートの施工に際して高炉セメントの性質を正しく理解して頂き、適切に工事することが肝要と考えます。

当協会は、鉄鋼メーカー・セメント・スラグ加工販売の 18 社と 2 団体で構成しており、高炉スラグのセメントへの更なる利用拡大を図り、高炉セメントを通じて二酸化炭素の削減に貢献したいと考えています。このたび、皆様に高炉セメントへのご理解を深めていただくため、「鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用」2024 年版を刊行いたしました。本冊子が皆様のお役にたてると幸いです。

2024 年 4 月

鉄鋼スラグ協会

目 次

はじめに

1. 高炉セメントの概要	1
2. 高炉セメントの各用途への利用	3
3. 高炉セメント使用による環境負荷低減と使用促進施策	9
4. 高炉セメントコンクリートの性質	17
4-1 コンクリートの強度発現性	17
4-2 塩化物遮蔽性能	18
4-3 化学抵抗性	23
4-4 アルカリシリカ反応抑制効果	25
4-5 鋼材腐食	30
4-6 水和発熱特性	36
4-7 コンクリートの収縮	41
4-8 凍結融解抵抗性	43
5. 高炉セメントの使用上の留意点	44
参考1. 鉄鋼スラグ・高炉スラグについて	55
参考2. 高炉スラグ微粉末について	59
参考3. 高炉セメントから派生した技術	64
参考4. コンクリートのカーボンニュートラル技術	65
おわりに	67
6. 付 録	68
付録-1 グリーン購入法の概要と高炉セメント・生コンの調達実績	68
付録-2 住宅確法・住宅性能表示制度における高炉セメントの扱いについて	70
付録-3 高炉セメントの製造	72
付録-4 高炉セメントのJIS規格	73
付録-5 高炉セメントの生産工場	74
付録-6 高炉セメント工場及び高炉セメント供給基地	75
付録-7 全国の高炉セメント需要比率の推移	84
付録-8 全国の高炉セメント生産量と高炉比率の推移	85
付録-9 セメント販売高の推移	86
付録-10 2022年度全セメント・高炉セメント都道府県別販売高	87
付録-11 2017～22年度セメント種類別地区別販売高	88
7. 参 考 文 献	90

1. 高炉セメントの概要

(1) 高炉セメントについて

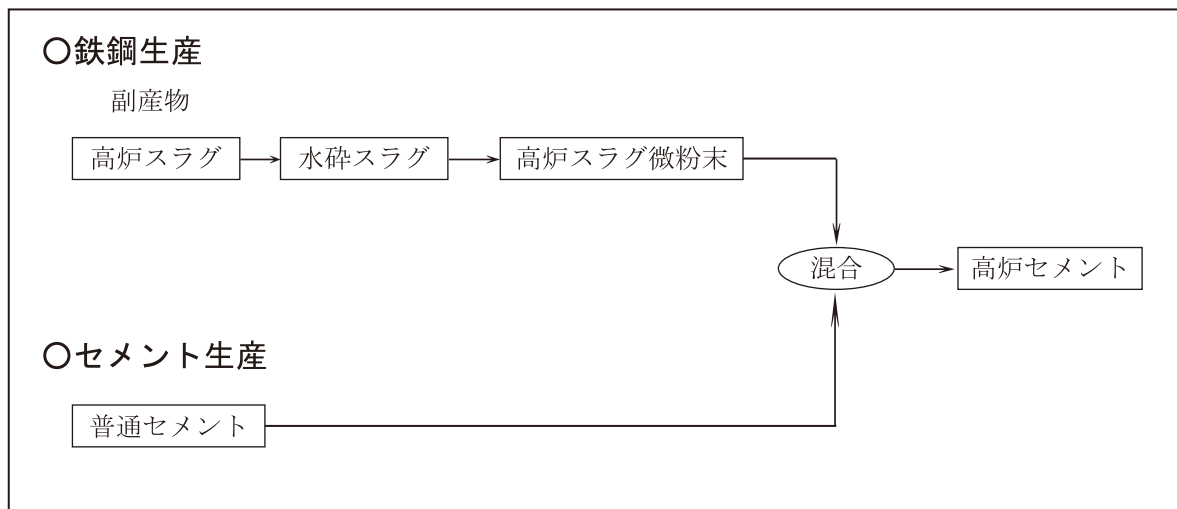


図 1. 高炉セメントの製造

高炉セメントは、高炉スラグを水で急冷した水砕スラグを粉砕した高炉スラグ微粉末と、普通セメントを混合して製造される。(p.72 参照)

表 1. JIS R 5211 高炉セメント

種 類	高炉スラグの分量 (質量%)
高炉セメント A 種	5 を超え 30 以下
高炉セメント B 種	30 を超え 60 以下
高炉セメント C 種	60 を超え 70 以下

現在使用されている高炉セメントは殆どがB種で、A種とC種は少ない。また、セメント各社が一般工事向けに販売している高炉セメントB種のスラグ分量は40～45%程度で、品質の変動幅は普通セメントと同程度である。

高炉セメントの供給体制は、一部の離島と沖縄県を除き、全国的に整備されている。

(p.75～83 参照)

(2) 高炉セメントコンクリートの性質

高炉セメントコンクリートは、普通セメントコンクリートに比べ次のような長所がある。

- ① 耐海水性や化学抵抗性が大きく、塩化物イオンの拡散係数が小さい。
(p.18, 23参照)
 - ② アルカリシリカ反応の抑制効果がある。(p.25 参照)
 - ③ 水密性が高い。
 - ④ 発熱速度が小さい。(p.39 参照)
 - ⑤ 長期強度の増進が大きい。(p.17 参照)
- また、地盤改良工事に使用した場合、六価クロムの溶出が少ない。(p.8 参照)

上記の長所から、海洋構造物、河川構造物、道路・鉄道構造物、上下水道構造物、温泉地帯の構造物、各種土木・建築基礎、地盤改良工事等に高炉セメントは、多く使用されている。

土木学会は、2017年制定のコンクリート標準示方書・設計編：標準の2編2章に新設された『耐久設計の基本』において、「環境作用に応じた適切な材料を選定し、耐久性確保のため確実な施工が行えるよう配慮しながら、設計しなければならない」と明記するとともに、飛来塩分や凍結防止剤による多量の塩化物イオンが供給される構造物や化学的浸食の厳しい環境には、混合セメントの使用を検討することを求めている。

一方、高炉セメントコンクリートには「初期強度が小さい (p.17 参照)」という性質があるので、高炉セメントコンクリートの施工にあたっては適切な配慮が必要である。

2. 高炉セメントの各用途への利用

(1) 高炉セメントの土木工事への利用

高炉セメントはこれまで公共土木工事への使用が多い。発注する官公庁の共通仕様書・特記仕様書等ではコンクリートの工種毎に、早強セメント・普通セメント・高炉セメント B 種の使い分けをしているが、その一般的な例を表 1. に示す。

国等の直轄工事では、使用されるセメントは高炉セメントが多数採用されている。(p.69 参照)

表 1. セメント種類別適用工種の例

セメント種類	コンクリートの要求性能・その他	工 種
高炉セメント B 種	○無筋コンクリート ○海水・潮風の影響を受ける鉄筋コンクリート等 ○部材断面の大きい鉄筋コンクリート	均しコンクリート、側溝、管渠、重力式擁壁、重力式橋台、護岸の基礎、笠コンクリート、帯コンクリート、集水桝、法枠、消波根固ブロック、トンネルライニング、半重力式橋台および擁壁、RC擁壁、U型擁壁、暗渠、洞門、水門、樋門、樋管、橋脚、橋台、共同溝、地下道、函渠、ケーソン基礎の中詰、水中コンクリート、場所打ち杭、深礎杭、水叩、ダム、護岸、舗装、港湾工事一般
普通セメント	早期に強度を必要とし、部材断面の小さい鉄筋コンクリート	PC樋管、ラーメン橋、スラブ橋、非合成床版、合成桁床版等
早強セメント	早期に高強度を必要とする鉄筋コンクリート	ケーソン基礎躯体コンクリート、PC桁等

高炉セメント B 種は土木工事に多用され、これまで土木学会「コンクリート標準示方書」の規定を基に設計・施工が行われていた。一方で、温暖化対策から各種高炉セメントの使用ニーズが高まったことから、土木学会は 2018 年に「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針」及び混合セメントの JIS に規定される混合材の分量を超える配合の適用も考慮し「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」を発刊した。

こうした動きを受け、2023 年度制定「コンクリート標準示方書(施工編：目的別コンクリート)」では「5 章：混和材を多量に使用したコンクリート」において、混合セメント JIS の混和材使用量の上限を超える結合材の仕様が規定され、「5.1 一般 (1) 混和材を質量比で結合材の 70%~90% 用い、混和材の 50% 以上に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートを対象とする」と適用範囲が明記された。また、同解説欄には、「高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の産業副産物をポルトランドセメントの代替として使用することにより、天然資源の消費量や二酸化炭素の排出量が削減され、環境負荷の低減が期待できるとともに、ポルトランドセメントによる水和熱の低減、塩化物イオンの侵入に対する抵抗性の向上、アルカリシリカ反応の抑制も期待できる。」と記述されており、各種混和材の有効利用を推進している。

(2) 高炉セメントの建築工事への利用

—日本建築学会 建築工事標準仕様書 JASS5 の改定概要について—

前回の2009年の改定以降、コンクリート工事に関する社会情勢の変化から、防災減災への対応、建設業の生産性向上、環境負荷低減を含む SDGs への配慮を考慮して2022年11月に大改定が実施された。今回の改定では、環境性能の定量化を目的に、新たに環境性が導入され、副産物やリサイクル材の使用量に応じて、等級0から等級3までの4段階で評価出来るようになった。また、混合セメントの有効活用を推進するため、高炉セメントA種からC種の広い領域において、具体的な施工要領（養生期間、型枠脱型時期等）が明記された。

I.環境性能

2節 構造体及び部位・部材の要求性能

部材の要求性能として新たに環境性が規定された。

2.1 総則

c. 構造体及び部位部材は、設計図書及び本節で定めた要求性能を満たすように施工する。

2.2 要求性能の種類

構造体および部位・部材に要求される性能の種類は、次に示すものとする。

1) 構造安定性

2) 耐久性

3) 耐火性

4) 使用性

5) 環境性（新規）

6) 位置・断面寸法の制度及び仕上がり状態

3節 コンクリートの種類および品質

3.9 環境性（新規）

「環境性」として、「資源循環性」、「低炭素性」、「環境安全品質」が定義され、この内、「資源循環性」、「低炭素性」は、次に示す等級で評価され、部位・部材ごとに特記することとなった。

資源循環性

- ・ここでは練混ぜ水、結合材、細骨材および粗骨材を使用材料別にサブ等級で定義し、その合計値で評価される（表1）。
- ・結合材の場合、混和材の分量が多ければ、より多くのサブ等級ポイントが得られる（表2）。

表 1. 資源循環等級に対する資源循環サブ等級のポイントの合計値*

水 準	資源循環サブ等級の 合計値
資源循環等級 0 :	0
資源循環等級 1 :	1
資源循環等級 2 :	2 以上 4 以下
資源循環等級 3 :	5 以上

表 2. 結合材の種類による資源循環サブ等級*

水 準	使用する材料の種類および使用量	ポイント
資源循環サブ等級0	原料に廃棄物・副産物を利用していることが明確でないセメント	0
資源循環サブ等級1	結合材の全量が次のいずれかの場合 <ul style="list-style-type: none"> ●ポルトランドセメント ●高炉セメントA種およびB種 ●フライアッシュセメントA種およびB種 ●ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を混合したもの、ただし、高炉スラグ微粉末の質量分率が結合材料の5%を超え60%以下。 ●ポルトランドセメントにフライアッシュを混合したもの、ただし、フライアッシュの質量分率が結合材料の5%を超え20%以下。 	1
資源循環サブ等級2	結合材の全量が次のいずれかの場合 <ul style="list-style-type: none"> ●高炉セメントC種 ●フライアッシュセメントC種 ●エコセメント ●ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を混合したもの、ただし、高炉スラグ微粉末の質量分率が結合材料の60%を超えるもの。 ●ポルトランドセメントにフライアッシュを混合したもの、ただし、フライアッシュの質量分率が結合材料の20%を超えるもの。 	2

低炭素性

- ・ 結合材に占める混和材の分量に応じて等級が付与される（表3）。
- ・ 高炉セメントを使用することで高位の等級に対応。

表 3. 低炭素等級に応じた結合材の種類

水 準	使用する結合材の種類
低炭素等級 0 :	●ポルトランドセメント
低炭素等級 1 :	●高炉セメントA種 ●フライアッシュセメントA種、B種、C種 ●ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカヒュームまたは火山ガラス微粉末を混合したもの、ただし、それらの質量百分率が結合材料の5%を超え30%以下であるもの。
低炭素等級 2 :	●高炉セメントB種 ●ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカヒュームまたは火山ガラス微粉末を混合したもの、ただし、それらの質量百分率が結合材料の30%を超え60%以下であるもの。
低炭素等級 3 :	●高炉セメントC種 ●ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカヒュームまたは火山ガラス微粉末を混合したもの、ただし、それらの質量百分率が結合材料の60%を超えるもの。

*混合セメントはセメント工場で、普通セメントと混和材を混合して高炉セメントA～C種として出荷するケースと、生コンプラントで、両者を混合してコンクリートとして出荷するケースの2種類がある。そのため、表2及び3では、こうしたケースを想定し、何れの製造方法でも環境性の評価が可能となる様に、混合セメントの種類や、混和材の分量が規定されている。

II.施工方法におけるセメント・結合材の使用基準の見直し

低炭素化・資源循環の促進という改定の基本方針に基づき、25 節 水中コンクリートおよび30 節 無筋コンクリートにおいて、低炭素性・資源循環性に優れた結合材の適用が標準化された。表4に高炉セメントに関する主な改定事項を示す。

表4. その他高炉セメントに関する改定事項

節	項目	改定概要
4節. コンクリートの材料	4.2 セメント	旧版に記載されていたc項「計画供用期間の級が長期の場合、使用するセメントは上記a.のうちポルトランドセメント、もしくは高炉セメント、シリカセメント、フライアッシュセメントのうちA種に適合するものを原則とする」が削除され、計画供用期間の級が長期の場合でも高炉セメントが適用可能になった。
5節. 調合	5.2 調合を定めるための条件	ここでは、レディーミクストコンクリート工場にて配合計画書を設定するための条件が規定されている。スランプ、空気量、水粉体比の最大値といった一般的なコンクリート諸元と同様に、「(5)環境性などに応じた各材料の種類と使用量」を新たに追加。
	5.3 調合管理強度	構造体強度補正值 ($_{28}S_{91}$) の標準値として表5.1に高炉セメントC種を追加。
8節. 養生	8.2 湿潤養生	湿潤養生期間として表8.1に高炉セメントC種の場合を追加。
9節. 型枠工事	9.10 型枠の存置期間	基礎・梁側・柱および壁のせき板の存置期間として表9.1に高炉セメントC種の場合を追加。
14節. 軽量コンクリート	14.4 コンクリートの材料	旧版では高炉セメントA種までが使用可能であったが、高炉セメントB種まで使用できるようになった。
21節. マスコンクリート	21.5 コンクリートの調合	マスコンクリートの構造体強度補正值 ($_{28}SM_{91}$) の標準値として表21.1に高炉セメントC種が追加された。
24節. 水中コンクリート	24.4 コンクリートの材料	特記がない場合、設計基準強度が $36N/mm^2$ 以下の場合は高炉セメントB種が標準となった。
30節. 無筋コンクリート	30.4 コンクリートの材料	特記がない場合、結合材の種類は高炉セメント、フライアッシュセメント、普通エコセメントとなった。

(3) 高炉セメントのコンクリート製品への利用

コンクリート製品は、蒸気養生を行うことが多く、さらに、コンクリートの配合は一般に低水セメント比であることから、高炉セメントコンクリートの初期強度は大幅に増加する。特に、即時脱型方式で製造される製品では、型枠の回転も問題が小さいと考えられる。

これまで、コンクリート製品に高炉セメントを使用する例は少なかったが、高炉セメントには次のような性質があるので、今後コンクリート製品分野での使用が望まれる。

- ① アルカリシリカ反応抑制効果があり、骨材の選択肢が広がる。(p.25 参照)
- ② 塩化物遮蔽性能が高く、凍結防止剤に含まれる塩化物イオンによる鉄筋の腐食が抑制されるため、道路用コンクリート製品の耐久性向上が期待できる。(p.18 参照)
- ③ エフロレッセンスの発生が少ない。
- ④ エトリンガイトの遅延生成 (DEF) による膨張が抑制される。

エトリンガイトの遅延生成 (DEF) は、コンクリートが硬化する初期段階で高温を受けることにより、その時点で生成していたエトリンガイトが分解し、その状態で硬化したコンクリートへ雨水などの水分が作用して、再びエトリンガイトが生成する現象である。エトリンガイトの再生成に伴う膨張量が大きくなると、ひび割れを生じることがある。

日本コンクリート工学会の「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016」には、DEFによるひび割れ防止対策として、高炉セメント B 種や高炉スラグ微粉末の使用は効果があること、蒸気養生の最高温度の限界値は 70℃とするのがよいとしている。さらに、国内外の実験結果を集約したコンクリートの条件別に最高温度の限界値 (閾値) が示されているので参考にされるとよい。(文献 1)

高炉セメント B 種を使用したコンクリートの蒸気養生最高温度：65℃の場合のコンクリート強度の一例を図 2. に示す (文献 2)。材齢 1 日の圧縮強度は 20N/mm² を上回り、その後の気中養生による強度の増加も十分期待できる。

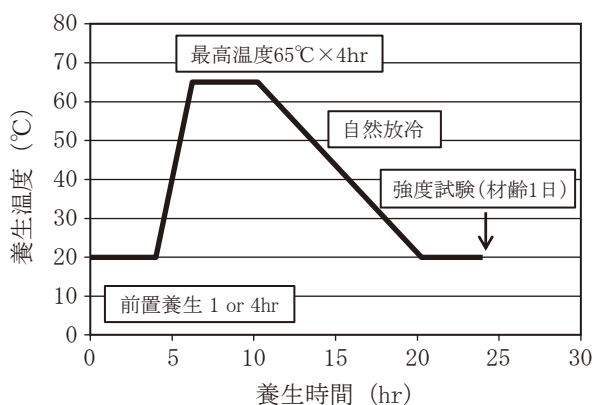


図 1. 蒸気養生条件

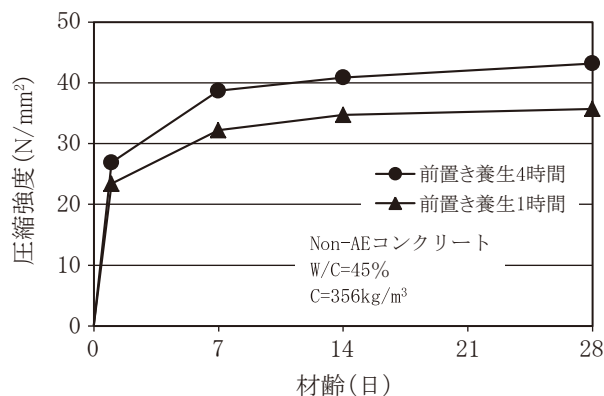


図 2. 高炉セメントコンクリートの圧縮強度

(4) 高炉セメントの地盤改良工事への利用

地盤改良工事に使用される材料は、大別するとセメント系と石灰系がある。セメント系では通常高炉セメント、普通セメント、セメント系固化材が使用されている。セメント系の中でどの材料を使用するかは、改良対象土壌により表 1.などを参考にし、室内配合試験を実施して決める。

高炉セメント B 種は、砂質土、粘性土等の一般軟弱土の改良に適している。

表 1. 各種固化材の選択の目安

改良材の種類	普通セメント	高炉セメントB種	セメント系固化材
砂質土	○	○	○
粘性土	○	○	◎
火山灰質粘性土	○	△	◎
有機質土	△	○	◎
高有機質土	×	△	◎

◎最適、○適、△やや適、×不適

(文献 3)

2000 年 3 月 24 日の旧建設省通達「セメント及びセメント系固化材の地盤改良への使用及び改良土の再利用に関する当面の措置」(2001 年 4 月 20 日一部変更)では、参考資料の中に六価クロムの溶出が少ない固化材として「高炉セメント」が紹介されている。

(国土交通省ホームページ：<https://www.mlit.go.jp/tec/kankyoku/kurom02.html>)

(最終アクセス確認日：2024 年 2 月 29 日、以下の URL も同様に確認)

高炉セメントに含まれる六価クロムは、高炉セメントの 55～60%の原料となる普通セメントに起因するものである。一方、高炉セメントの 40～45%の原料である高炉スラグは、還元炉である高炉でつくられるため、六価クロムは含まれず、さらに、高炉スラグ微粉末は、六価クロムを還元する機能を有することも知られている。

従って、一般に普通セメントに比べ高炉セメントは六価クロムの含有量が少なく、溶出量も少ない。

しかし、高炉セメントの場合も、地盤改良工事に使用する際は事前に改良土の溶出試験を行い、土壤環境基準を満たすことを確認しなければならない。

3. 高炉セメント使用による環境負荷低減と使用促進施策

(1)高炉セメントによる環境負荷低減

○地球温暖化ガス二酸化炭素排出量の低減

高炉セメントと普通セメントの製造概略を図1. に、セメント1 t当たりのCO₂排出量の一例を表1. に示す。

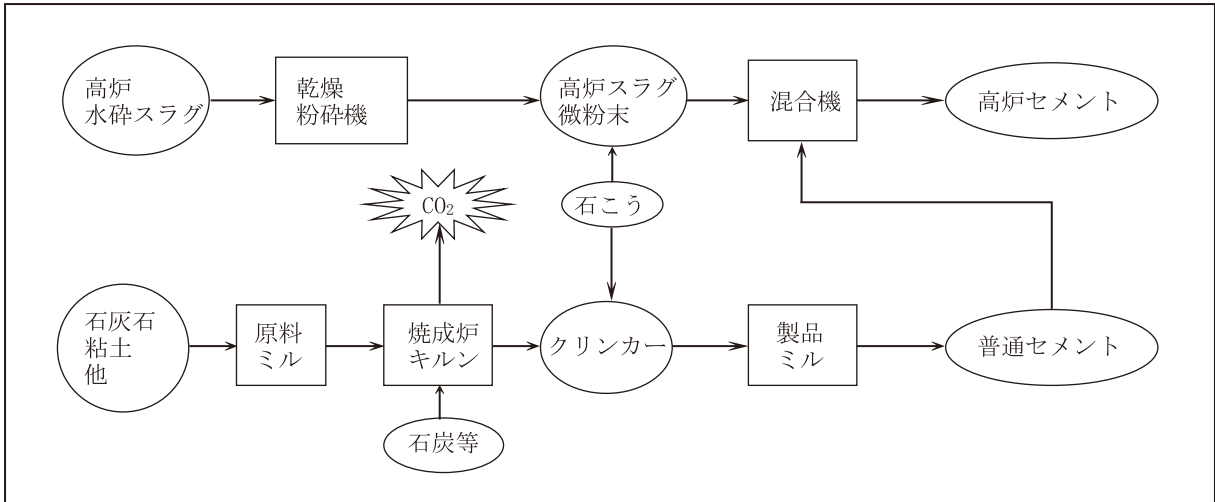


図 1. 高炉セメントと普通セメントの製造概略

高炉セメントは石灰石・エネルギーの消費が少ないため、石灰石の熱分解や熱エネルギーに起因する二酸化炭素の排出量が低減できる。

石灰石の熱分解反応式



表 1. セメント1 t当たりのCO₂排出量の一例

単位 : kg

CO ₂ 排出源	ポルトランドセメント CO ₂ 排出量①	高炉セメントB種 CO ₂ 排出量②	CO ₂ 削減量 ①-②	CO ₂ 削減率 %
石灰石	477	269	208	44
エネルギー	311	189	122	39
計	789	458	331	42

(セメント協会 HP 2023年2月 LCI データ)

表1. に示すように高炉セメントB種は、ポルトランドセメントに比べCO₂排出量が331kg/t少ないため、年間約315万 tのCO₂削減に貢献している。

▲331kg/t × 952万 t (2022年度高炉セメント生産高) ≒ ▲315万 t

○省エネルギー

高炉セメントは、混合する高炉スラグ微粉末の焼成工程が不要であるため、普通セメントに比べて製造時に必要なエネルギーを高炉セメント B種の場合、約40%削減できる。

○石灰石資源の節約と自然環境の維持

高炉セメントは、スラグの混合量の分だけ普通セメントの使用量が少ないため、普通セメントの主原料である石灰石を約 40%節約でき、天然資源の温存及び自然環境の維持に繋がる。

表 2. 石灰石の用途別出荷量 (2022年度)

単位：千 t

セメント	53,592	43%
コンクリート骨材	28,959	23%
鉄鋼・製錬	17,279	14%
その他	26,127	21%
合計	125,956	—

(石灰石鉱業協会HP 統計資料)

(2)国・地方公共団体・民間等の高炉セメントの積極的採用

高炉セメントの使用は、(1) で述べたとおり環境負荷低減効果が大きいことから、国等の方針として高炉セメントの使用促進を図るため、次の事が実施されている。

① グリーン購入法における公共工事分野で高炉セメントを特定調達品目に指定

「国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律」(グリーン購入法)で、公共工事の資材として、セメント製造時に二酸化炭素排出量の少ない高炉セメントが、2001年に特定調達品目に指定された結果、国および独立行政法人等の機関での高炉セメントの使用が増加した(p.69参照)。また、地方自治体には高炉セメントをリサイクル認定材料に指定することにより、その使用を促しているところがある。

国土交通省の高炉セメントに関するグリーン購入調達方針の内容は、以下の通りです。

16. 公共工事

「高炉セメントについては、供給状況に地域差があることに留意しつつ、河川工事における護岸基礎、道路工事における橋梁下部工、港湾工事や海岸工事における消波ブロック、空港工事における舗装などで、早期強度を必要としない場合に、その使用を推進する。」(原文)

国土交通省によれば、本調達方針は、「高炉セメントについては、供給状況に地域差があることに留意しつつ」、「早期強度を必要としない場合に、その使用を推進する。」ことがその趣旨である、とのことです。

即ち、「河川工事における護岸基礎、道路工事における橋梁下部工、港湾工事や海岸工事における消波ブロック、空港工事における舗装などで」とあるのは、早期強度を必要としない工事内容を例示するために示されています。

換言すれば、本調達方針の趣旨を、「河川工事における護岸基礎、道路工事における橋梁下部工、港湾工事や海岸工事における消波ブロック、空港工事における舗装など」の中で、かつ、「早期強度を必要としない場合に、その使用を推進する。」と読むことは、誤った理解となりますので、注意する必要があります。

② 我が国の地球温暖化対策における混合セメントの使用促進

地球温暖化対策推進法に基づき策定された京都議定書目標達成計画及びその後の地球温暖化対策計画には一貫して、「非エネルギー起源二酸化炭素」の削減対策として「混合セメントの利用拡大」が織り込まれている。2021年10月22日閣議決定された2030年度温室効果ガス削減目標（2013年度比▲46%）の計画へも引き継がれている。

混合セメントの利用を拡大することで、セメントの中間製品であるクリンカの生産量を低減し、クリンカ製造プロセスで原料（石灰石）から化学反応によって発生する二酸化炭素を削減する。

(環境省ホームページ：<http://www.env.go.jp/press/102512.html> より)

(3) 高炉セメントの一層の普及拡大に向けて

経済産業省では「セメント産業における非エネルギー起源二酸化炭素に関する調査報告書」を、2009年3月にまとめた。普及拡大の方向性として、次の6点を挙げている。

- ① メリットを生かした適所での活用促進
- ② ひび割れメカニズムの解明と対策検討
- ③ 長期養生に関する受容体制の促進
- ④ 建築分野への適用可能性に関する検討
- ⑤ 建設工事受発注者等の動機付け
- ⑥ 新たな混合セメントの開発促進

さらに、経済産業省では「混合セメントの普及拡大方策に関する検討」報告書を、2016年3月にまとめた。この報告書は、2015年7月にまとめられた約束草案の施策の一つに混合セメントの利用拡大があげられたことから、有識者と関係業界による委員会において討議されたものである。同報告書では、混合セメントの普及拡大に向けた次の4つの方向性について、それぞれの内容と主体が示された。(p16 参照)

- ① 混合セメントの普及・啓発【利用側への普及・啓発】
- ② 混合セメントの環境価値を評価する仕組づくり【利用側へのインセンティブの付与】
- ③ 供給側が混合セメントを供給しやすい環境づくり【供給側へのビジネス支援】
- ④ 混合セメントの普及拡大に向けた基盤整備【体制整備・規制や基準の見直し】

加えて、混合セメント使用状況について現状（2013年）の推計値と将来（2030年）推計値を掲載し（p15 参照）2030年までのロードマップを提案している。同報告書は、次の URL で公表されている。

https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12685722/www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/jyutaku/index.html

一方で、セメント協会は2020年3月に「脱炭素社会を目指すセメント産業の長期ビジョン」を公表した。この中で、脱炭素社会に向け克服すべき課題として「クリンカ比率の低減」を挙げ、以下の方策を検討することが記載されている。

- 1) ポルトランドセメントに添加する少量混合成分を増量する。
- 2) 高炉セメント B 種に添加する高炉スラグの分量を増量する。

さらに、国際的にも新たな成長戦略として気候変動への取り組みは加速しており、2021年G20サミットで日本政府は、温室効果ガスの排出を2050年までに実質ゼロにするとして脱炭素社会を実現することを宣言した。同年、国土交通省は「グリーン社会実現推進本部」を設置し、以後、様々な政策を打ち出し試行工事を実施している。

国土交通省グリーン社会実現推進本部：

https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_fr_000148.html

高炉セメントの普及に関連する、これまでの土木学会並びに日本建築学会の指針類の制定や行政の取組みについて、主な事項を次ページ以降に整理した。

<高炉セメント普及拡大に関わる主な動き（1950～2017年）>

年	JIS及び学協会等	国の施策および行政
1950	JIS R 5211「高炉セメント」制定	
1978	日本建築学会：「高炉セメントを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説」発刊	
1988	土木学会：「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針(案)」発刊	
1989		建設省：技調発第370号「アルカリ骨材反応抑制対策について」対策として高炉セメントの使用を明記
1995	JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」制定	
1996	土木学会：「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針」発刊	
	日本建築学会：「高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説」発刊	
2001		グリーン購入法特定調達品目：「高炉セメント」が指定される
		国土交通省：「公共建築工事標準仕様書」に高炉セメントが仕様化される
2002		国土交通省地方整備局：「土木工事共通仕様書」に高炉セメントの仕様化が広まる
		各自治体：「建築環境総合性能評価システム(CASBEE)」(高炉セメント使用により加点)が始まる
2003		農林水産省および各自治体：「土木工事共通仕様書」に高炉セメントの仕様化が広まる
2005		京都議定書の目標達成計画：「混合セメントの利用拡大」が織り込まれる
2008	日本建築学会：「鉄筋コンクリート造建築物の環境配慮施工指針(案)・同解説」発刊し、環境配慮する設計には高炉セメントの使用を促す	
2009		経済産業省：「セメント産業における非エネルギー起源二酸化炭素に関する調査報告書」で混合セメントの普及拡大の方策を提示
2010		高速道路会社各社、旅客鉄道会社各社：耐久性向上策として高炉セメント仕様拡大が広まる
2012		都市の低炭素化の促進に関する法律(略称：エコまち法)公布(建築物への高炉セメント使用を促す)
2015	日本建築学会：「コンクリートの調合設計指針・同解説」を第3次改定し、コンクリートに要求する性能へ環境配慮項目を組み込む	
2016	土木研究所：「低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン(案)」と6編の「施工マニュアル(案)」刊行(2018年に土木学会より発刊された「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」へ発展)	経済産業省：「混合セメントの普及拡大に関する検討報告書」で2030年までの混合セメント普及拡大ロードマップを示す
		閣議決定：パリ協定による日本の2030年度の温室効果ガス削減目標の温暖化対策計画に「混合セメントの利用拡大」が織り込まれる
2017	土木学会：コンクリート標準示方書を改訂し、設計編の鋼材腐食の照査へ「水の浸透」による照査を加えた(従来からある「中性化」による照査は併記)	
	日本建築学会：「高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の調合設計・施工指針(案)・同解説」発刊	

<高炉セメント普及拡大に関わる主な動き（2018年以降）>

年	JIS 及び学協会等	国の施策および行政
2018	土木学会：「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針」ならびに「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」発刊	
2021		閣議決定：2030年度温室効果ガス削減目標（2013年度比▲46.0%）の地球温暖化対策計画に「混合セメントの利用拡大」が織り込まれる
2022	日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS5 に新たに環境性が規定され高炉セメントの使用が評価対象となる	国土交通省：「国土交通省グリーンチャレンジ」を策定し、直轄工事で「低炭素コンクリートブロック」を使用した試行工事を実施
2023	不動産協会：建築工事発注事業者のための「建設時 GHG 排出量算定マニュアル」を策定し同協会内で運用	関東地方整備局港湾空港部：「港湾工事等における低炭素型材料の活用マニュアル」を策定
	土木学会：コンクリート標準示方書を改訂し、施工編・目的別コンクリートへ「5章 混和材を大量に使用したコンクリート」を新設	
	土木学会：コンクリートライブラリー 165「コンクリート技術を活用したカーボンニュートラルの実現に向けて」を発刊	
2024	JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」改正：混和材の使用拡大を目的に、ポルトランドセメントと混和材、普通セメントと高炉セメント B 種の累加計量が可能となる	

国内における混合セメントの需給見通しとCO2削減効果(株)エックス都市研究所推計)

需要部門別(用途区分)の混合セメント使用状況の現状と将来推計値(株)エックス都市研究所推計)

2013年(現状値推計)(再掲)													2030年(将来推計値)(再掲)														
用途区分	全セメント 使用量 (百万t)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	BB使用量 (推定) (百万t)	用途区分	全セメント 使用量 (百万t)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	BB使用量 (推定) (百万t)		
建築	基礎・地下構造	5	20%											0.9	建築	基礎・地下構造	4	65%								2.6	
	上部構造	18	0%											0.0		上部構造	16	0%									
土木	国土交通省グリーン調達	2										94%	2.2	土木	国土交通省グリーン調達	2										100%	2.1
	その他土木	16	40%									6.4	その他土木		14	40%									5.7		
プレキャスト製品	6	2%											0	プレキャスト製品	5	3%											0.2
固化材	7	60%												4.2	固化材	6	60%								3.7		
輸出	9	0%											0.0	輸出	8	0%											0.0
全セメント計	62											高炉セメントB種計	13.8	全セメント計	56											高炉セメントB種計	14.3

*株式会社 エックス都市研究所推計
注)四捨五入の関係で合計が合わない場合がある。

*株式会社 エックス都市研究所推計
注)四捨五入の関係で合計が合わない場合がある。

現状(2013年)の混合セメント生産量 13,788千トン
混合セメント利用率:22.1%
1990年のベースライン比で検討
2013年で約69万t-CO2削減

将来(2030年)の混合セメント生産量推計値 14,270千トン
混合セメント利用率:25.7%
1990年のベースライン比で検討
約束草案の目標年度2030年度
約100万t-CO2削減

【参考】CO2削減効果試算

単位	年度	セメント生産量 千t	混合セメント 生産量 千t	普通セメント 生産量 千t	混合セメント 利用率 %	石灰石使用量 千t	石灰石による CO2排出量 万t-CO2	BAU時の石灰石 使用量 千t	BAU時の石灰石による CO2排出量 万t-CO2	BAU対比の CO2削減量 万t-CO2
基準年	1990	90,177	14,728	75,449	16.3%	91,669	3,804	91,669	3,804	0
現状	2013	62,392	13,788	48,604	22.1%	61,762	2,563	63,424	2,632	69
目標年	2030	55,580	14,270	41,310	25.7%	54,100	2,245	56,500	2,345	100

普通セメントの石灰石使用比	1.092
混合セメントの石灰石使用比	0.63
石灰石のCO2排出係数(kg-CO2/t-limestone)	415

データ出典) 将来のセメント生産量は、セメント協会の統計データを活用して推計
* 京都議定書目標達成計画の進捗状況 平成26年7月1日における算定方式で試算

＜今後の混合セメントの普及拡大方策＞

普及拡大の方向性 (方針・推進戦略)	全般的な問題認識	具体的方策(例)	対象	区分	時期	主体	個別課題等
方向1 混合セメント利用の普及・啓発 【利用側への普及・啓発】	□ 環境配慮要請の強まりを背景として、大手ゼネコンの混合セメントを活用した環境負荷低減コンクリート開発の動きが活発である。しかし、利用側にはそうした情報・意識が十分に浸透していない。	① ガイドライン・マニュアル・指針の普及 →混合セメントの利用先や利用方法をまとめたガイドライン等を普及 →コンクリート工事の適切な管理に係る普及・啓発	施主	自主的取組手法	短・中期	民	学会・関係団体等との連携
		② 混合セメント利用事例集の作成 →混合セメントの利用事例をまとめた冊子を作成	全体	情報的手法	短期	民	既存の動きとの連携
		③ 既存の混合セメント利用評価制度の周知 →CASBEE(建築環境総合性能評価システム)における混合セメント使用評価等の利用側への周知 →低炭素建築物認定制度における混合セメント使用評価等の周知	全体(建築等)	情報的手法	短・中期	官及び民	周知方法の検討
		④ 混合セメントの利用メリットのPR →ガイドライン・マニュアル・指針や事例集の周知 →混合セメントの利用拡大を掲げる企業を紹介	全体	情報的手法	短・中期	官及び民	学会・関係団体等との連携
方向2 混合セメントの環境価値を評価する仕組みづくり 【利用側へのインセンティブの付与】	□ 混合セメントには環境に優しいという大きなメリットがあるものの、その価値は利用側に十分に意識・認識されていない。このため、混合セメントの環境価値を評価し、利用側に訴えていくことが重要と考えられる。	① 市場メカニズムの活用 →混合セメントの利用をJ-クレジット制度に組み込み、そのCO2価値を認証	施主	経済的手法(市場メカニズムの活用)	短・中期	官	方法論での民の積極的活用
		② 混合セメントの環境価値の「見える化」 →建築物の混合セメント活用状況の表示促進 →環境ラベルとして建築物に混合セメント使用章(環境表示)を創設	施主	情報的手法	中期	民	自治体等との連携
		③ 既存制度の混合セメント利用評価制度の活用 →CASBEE(建築環境総合性能評価システム)を活用し、環境負荷の少ない資機材の使用といった環境配慮の取組み推進 →低炭素建築物認定制度における混合セメント利用の評価の再周知や適正な運用への働きかけ →高炉セメントを、生コン納入書の環境ラベル『メビウスループ』の対象とするようJISを改正 →東京都マンション環境性能表示に混合セメント使用を見える化し、他自治体に拡大	施主	規制的手法(枠組規制)	中期	官及び民	民の主体性の発揮 自治体等との連携
		④ グリーン調達やリサイクル品認定制度での採用拡大 →混合セメント等を利用したプレキャストコンクリート製品などの採用	施主	規制的手法(枠組規制)	中期	官及び民	民の主体性の発揮 自治体等の連携
		⑤ 環境自主行動計画の活用(建設業者・施主・設計事務所等を対象) →計画における混合セメント利用方針の反映促進 →CO2削減効果の計画へのカウント可能性の検討 →環境自主行動計画への利用のPR	全体	自主的取組手法	中期	民	既存の動きとの連携
方向3 供給側が混合セメントを供給しやすい環境づくり 【供給側のビジネス支援】	□ 混合セメントの普及利用拡大に向けては、技術開発事業を活発化させることや、補助金導入による市場への喚起等、供給側が市場に供給しやすい環境(供給側のビジネス支援)を整えていくことが重要と考えられる。	① 混合セメントの技術開発支援や適切な施工管理方法の推奨 →混合セメントの技術開発の支援(ひび割れ対策等) →適正な施工管理方法の推奨	建設工事業者 原料供給者等	経済的手法(助成・補助金) 情報的手法	短・中期	官	財源調達 自治体や地方局との連携
		② 混合セメントの市場拡大に向けた補助制度等のあり方検討 →関係者間での補助制度の是非についての検討 →効果的な補助の手法、制度設計	全体	経済的手法(助成・補助金)	中・長期	官	民の主体性の発揮 合意形成 財源調達
		③ 混合セメントの製造・流通体制の整備に向けた検討 →生コンにおける混和材の使用拡大の可能性検討 →サプライチェーンにおける課題の実証的検討	建設工事業者 生コンメーカー セメントメーカー等	自主的取組手法	中・長期	民	既存の動きとの連携
方向4 混合セメントの普及拡大に向けた基盤整備 【体制整備・規制や基準の見直し】	□ 過年度調査で示した施策例について、一部実行に移されたものもあるが、多くは十分に展開できていない側面もあり、このことを踏まえると、今後の混合セメントの普及拡大に向け、短期、中・長期の両方を睨みながら、その推進基盤を整えていく必要がある。	① 混合セメントの普及推進体制の構築 →今回調査で示した方向・施策のフォローアップ体制の構築、→混合セメント普及推進体制の検討	全体	自主的取組手法	短期	官及び民	既存の動きとの連携
		② セメントの利用ルールの見直し →普通ポルトランドセメントの少量混合成分拡大の可能性検討 →セメントのデファクトのシフト(普通ポルトランドセメントを混合セメントA種にするなど)の可能性検討	建設工事業者 セメントメーカー等	規制的手法(枠組規制)	中・長期	官及び民	合意形成
		③ セメントの流通品種の検討	全体	規制的手法(枠組規制)	中・長期	官及び民	合意形成
		④ 廃棄物のクリンカ原料使用維持・拡大とそれに伴う課題検討	セメントメーカー等	自主的取組手法	中・長期	官及び民	合意形成
		⑤ 建築分野の基礎・地下構造部分等での使用拡大に向けた基盤整備 →建築分野での普及拡大の基盤づくりに係る公共並びに民間での継続的な検討	建設工事業者	自主的取組手法・ 規制的手法(直接規制)	中・長期	官及び民	合意形成

4. 高炉セメントコンクリートの性質

4-1. 高炉セメントコンクリートの強度発現性

普通セメントおよび各種高炉セメントを使用したコンクリートの標準養生を行った場合の材齢と圧縮強度の関係を図1に示す。

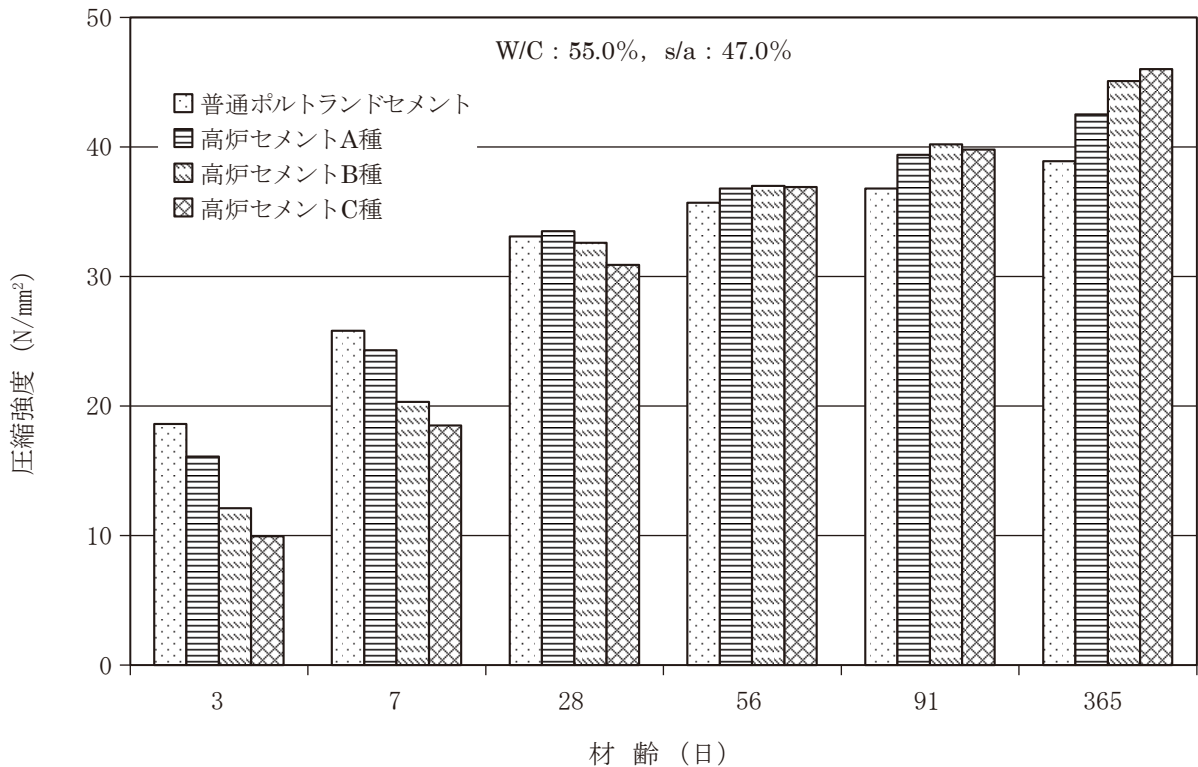


図1. 各種高炉セメントの材齢と圧縮強度の関係の測定例（鐵鋼スラグ協会 資料）

高炉セメントコンクリートの強度発現性は、同一水セメント比の場合、3日および7日の初期材齢では高炉スラグの置換率が多くなるに従って強度は低いが、材齢28日では高炉セメントA種とB種の強度が普通セメントとほぼ同等になる。

長期材齢では高炉セメントの強度が増進し、材齢56日以降では、すべての高炉セメントにおいて、普通セメントよりも高い強度になる。

4-2. 高炉セメントコンクリートの塩化物遮蔽性能

(1) 高炉セメントの耐塩害性

海洋環境下における高炉セメントコンクリートは、普通セメントコンクリートに比べて、耐海水性および塩分侵入の防止効果が大きく鉄筋を保護する性能がすぐれていることが、港湾空港技術研究所の試験結果などで確認されている。(文献6)

高炉セメントが耐塩害性に優れる理由は次のように考えられる。

- ① 高炉セメント硬化体は、普通セメント硬化体より全空隙率が小さく、毛細管空隙の細孔径分布が小径側にあるため、緻密化しており、塩化物イオンの拡散が小さい。
- ② 高炉セメント硬化体は普通セメントに比べて、塩化物イオンを多く捕捉する性質がある。

(2) 海洋環境の影響

図1. は、高炉セメント B 種および普通セメントを用いたコンクリート供試体を 10 年間感潮部に暴露した後、供試体の表面から深さ毎に塩化物イオン濃度を調べたものである。

(文献7)

普通セメントコンクリートの場合、コンクリートの内部まで塩化物イオンが拡散していることがわかる。一方、高炉セメントコンクリートの場合、塩化物イオンはコンクリート表面部分に留まり、内部には拡散し難いことを示している。

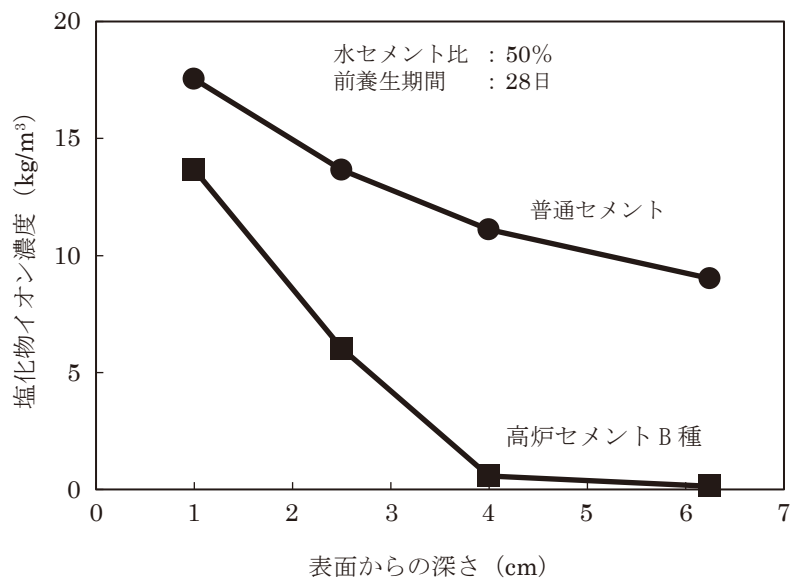


図 1. 感潮部に 10 年間暴露したコンクリートへの塩化物イオンの浸透

図2. は、海洋環境下で供用中の構造物等より採取したコンクリートの分析結果から、海洋環境下の柱部材の基本かぶり厚さである 70mm の部位での塩化物イオン量を予測した結果である。高炉セメント B 種を用いたコンクリートは普通セメントに比べ、塩化物イオン量が大幅に小さいことが示されている。(文献 8)

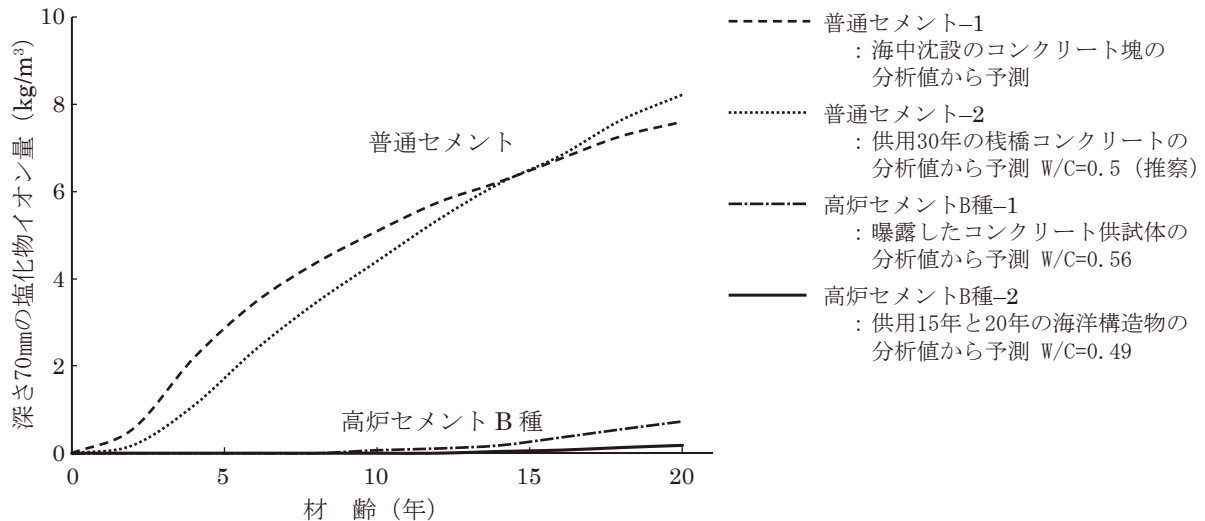


図 2. 70mm における塩化物イオン量の経年変化の予測
(文献 8 の図 5 に同文献の記述を参照した凡例の説明を加えた)

(3) 凍結防止剤の影響

1990 年に「スパイクタイヤ粉じんの発生に関する法律」が公布されて以来、道路面の凍結による交通傷害を防止するため、図 3 に示すように凍結防止剤の散布量が年々増加傾向にある。(文献 9)

我が国で使用される凍結防止剤（凍結抑制剤）の大半は塩化ナトリウムである。凍結防止剤がコンクリートに与える影響は、①「塩害とアルカリシリカ反応」と②「塩害と凍害」の 2 種類の複合劣化が生じる可能性が示されている。(文献 10)

- ① 凍結防止剤の使用によってコンクリートにナトリウムイオンが供給されることになり、アルカリシリカ反応による劣化を促す。これに凍害が加わると、コンクリートの劣化はさらに促進される。
- ② 凍害によるスケリングやポップアウトに伴うかぶりの減少によって凍結防止剤からの塩化物イオン供給が過大となり塩害を促進する。さらに、塩化物イオンの濃縮による浸透圧の上昇によって凍害が促進されるため複合劣化の可能性が大きくなる。

実際に、内陸部において道路橋などのコンクリート構造物への凍結防止剤散布による塩害（鉄筋コンクリート床版の土砂化）の発生が報告されている（文献 11, 12）。また、高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術委員会の報告でも、道路の劣化要因の一つに凍結防止剤の散布量増加を挙げている（文献 13）。なお、この報告を受け高速道路 3 会社では、10 年間で総額 3 兆円を投じる大規模更新・大規模修繕計画を 2014 年に発表した。

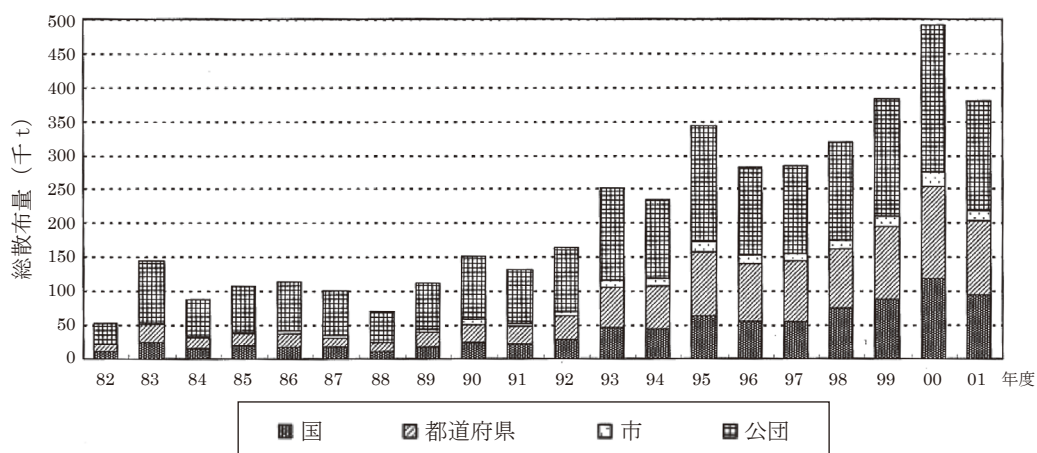


図3. 凍結防止剤の総散布量の推移

これら凍結防止剤散布による道路構造物への影響に対して、高炉セメント使用の有効性を示す報告がなされている（文献 14）。さらに 2014 年に創設された国家プロジェクトである戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）で公表された「RC 床版の耐久性確保の手引き（案）」（文献12）では、凍結抑制剤散布下における RC 床版の設計について、高炉セメント B 種などを用いる対策を打ち出している。

このように、今後、凍結防止剤を散布する地域に計画・施工される道路構造物の設計に際しては、高炉セメント・高炉スラグ微粉末を用いるコンクリートの採用が望まれる。

(4) 高炉セメントコンクリートの水セメント比と設計耐用年数

土木学会の「2022 年制定コンクリート標準示方書改訂資料」（コンクリートライブラリー 162）では、図4. 及び図5. に示すように、セメントの種類がかぶりの設計値に与える影響が試算されている。これらのグラフから、塩害環境下では高炉セメントは普通セメントに比べ、かぶり小さくなることわかる。

<計算条件>

構造物係数 γ_i : 1.0

コンクリートの材料係数 γ_c : 1.3

鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値のばらつきを考慮した安全係数 γ_{cl} : 1.3

コンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_o : 3.0, 4.5, 9.0, 13.0 kg/m³

コンクリートの初期塩化物イオン濃度 C_i : 0.30kg/m³

ひび割れの影響 : $w/l=0.000$ (ひび割れなし)

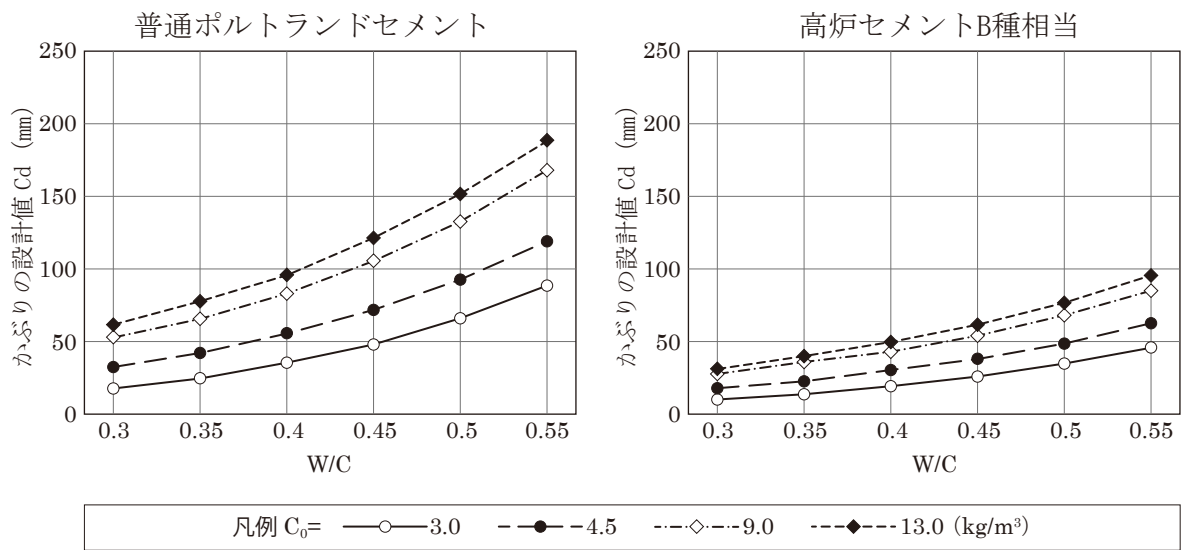


図4. かぶりの設計値の試算結果(設計耐用年数50年)

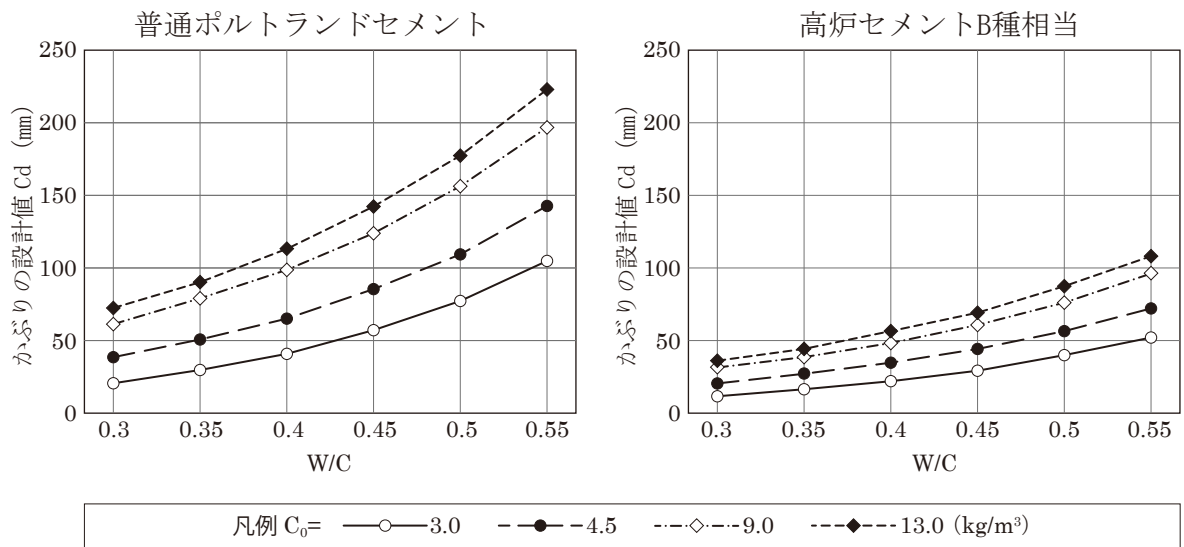


図5. かぶりの設計値の試算結果(設計耐用年数100年)

(5) 日本建築学会 JASS5に示される塩害環境下での耐久設計基準強度について

JASS5 改訂版(2022年11月発刊)では、海岸付近に建設される構造物の塩害対策として、表.1に示すように耐久設計基準強度の見直しが行われ、今回新たにフライアッシュセメントB種、高炉セメントC種、フライアッシュセメントC種の基準値が追加された。

これにより、高炉セメントはA～C種の範囲で、所要の耐用年数を確保するための施工基準が明記され、高炉セメントB種やC種の方が、塩化物イオン拡散係数が小さいため耐久設計基準強度の値が低く設定された。

表 1. 設計かぶり厚さと耐久設計基準強度

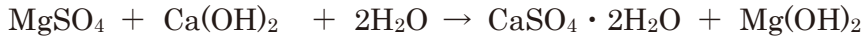
特殊劣化環境 (海水の作用) の区分	計画供用 期間の級	最小 かぶり 厚さ (mm)	耐久設計基準強度 (N/mm ²)	
			普通ポルトランドセメント 高炉セメントA種, A種相当 フライアッシュセメントA種, A種相当	高炉セメントB種, 高炉セメントB種相当 フライアッシュセメントB種, B種相当 高炉セメントC種, C種相当 フライアッシュセメントC種, C種相当
塩害環境	短期	50	39	36
		60	36	33
準塩害環境	短期	40	33	27
		50	27	27
	標準	40	39	36
		50	36	33
		60	33	27
	長期	50	39	36
60		36	33	

* 上記表中の「相当」について：日本建築学会で定義された用語。詳細は p35 を参照。

4-3. 高炉セメントの化学抵抗性

セメント硬化体は、硫酸塩等を含む水に接触すると膨張崩壊することがある。この現象は、ポルトランドセメントの水和生成物である水酸化カルシウム $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ の存在が原因といわれている。

次式のように、硫酸塩は、水酸化カルシウムと反応して硫酸カルシウム $[\text{CaSO}_4]$ を生成する。



この硫酸カルシウムがポルトランドセメント中の成分と反応して、エトリンガイト ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) を生成して膨張崩壊の原因となる。

高炉セメントが耐硫酸塩性に優れている理由は次のように考えられる。

- ① 高炉セメントは、ポルトランドセメントの分量が少ないため生成する水酸化カルシウムの量が少ない。
- ② 水酸化カルシウムは、一部スラグと反応して不溶性の安定な水和物となる。
- ③ 高炉セメントは水和物の組織が緻密化するため、浸食物質の内部への侵入を抑制する。

この傾向は、スラグ分量の多い高炉セメントほど顕著である。

図1. に硫酸ソーダ (Na_2SO_4) 5%溶液に、各種セメントモルタルを浸漬した場合の強度変化を、また、図2. にモルタル・コンクリートを温泉水に浸漬した場合の劣化の例を示す。(文献 15, 16)

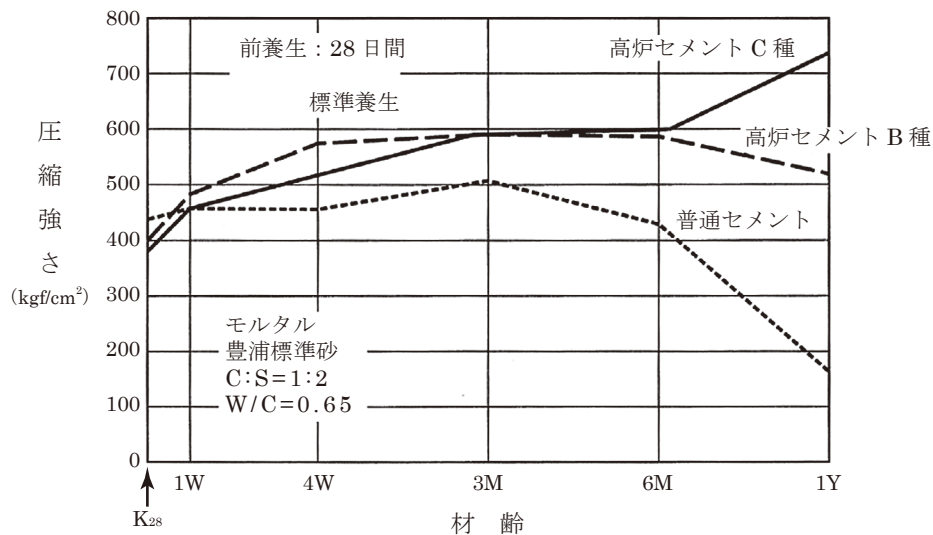


図 1. 硫酸ソーダ (Na_2SO_4) 5%溶液に浸漬したモルタルの圧縮強度

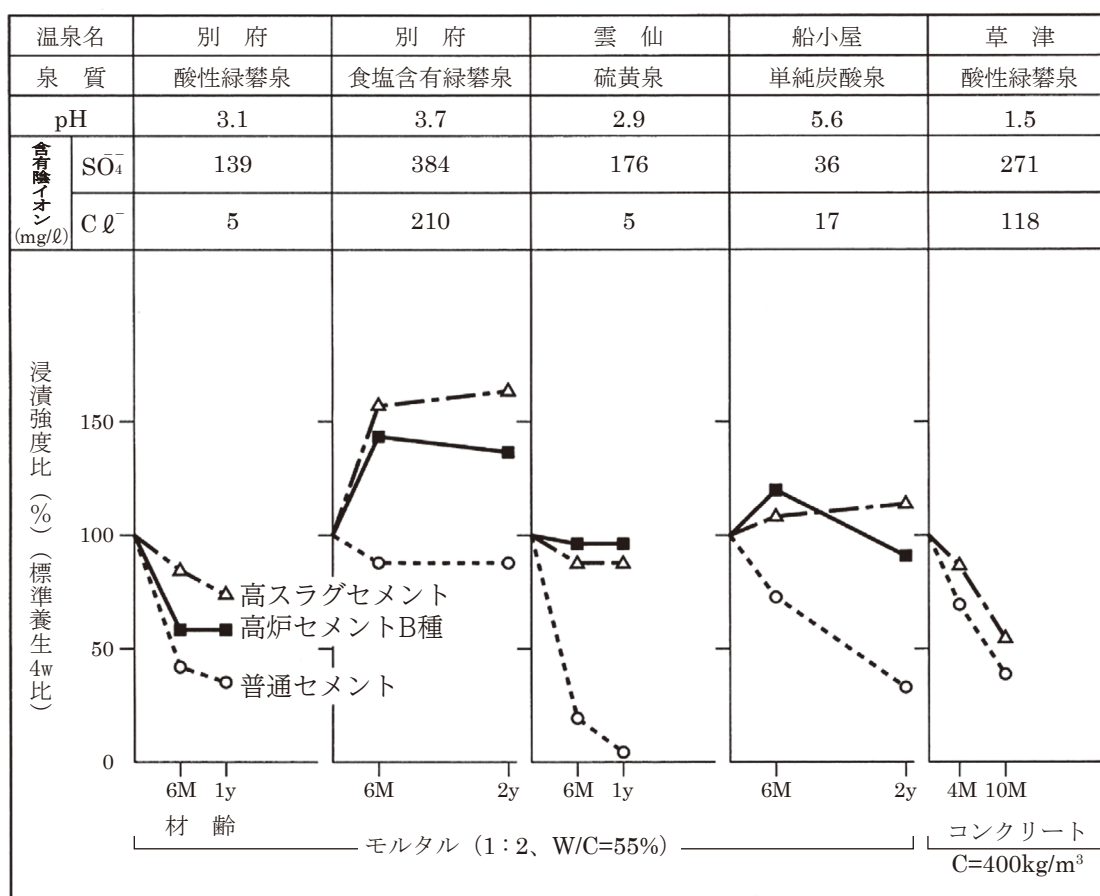


図 2. 温泉水に浸漬したモルタル・コンクリートの変化

高炉セメント B 種および C 種は普通セメントに比べ相対的に化学抵抗性が優れているが、強い酸や塩類に浸漬すると高炉セメントコンクリートも劣化する。このような場合はコンクリートと浸漬溶液の接触を防止する樹脂等による被覆工法が必要となる。

工場の跡地等で土壤中に硫酸塩等を含む場合、埋立地で地下水に海水が含まれる場合および温泉水等に対しては、一般に普通セメントより高炉セメントの方が耐久性に優れる。

4-4. 高炉セメントのアルカリシリカ反応抑制効果

アルカリシリカ反応とは、コンクリート中のアルカリ(Na^+ 、 K^+) とアルカリ反応性岩石(安山岩、流紋岩、チャート、頁岩など)が化学反応を起こし、コンクリートに有害な膨張を生じる現象をいう。

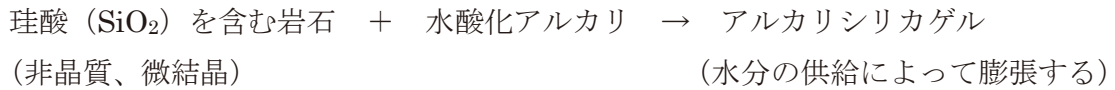


図1. に示すようにアルカリシリカ反応を起こす可能性のある骨材(無害でない骨材)は、全国に広く分布しており(文献 17, 18)、構造物の損傷事例も報告されている(p35 図3. の黒塗りの地域)。



図1. アルカリシリカ反応性骨材分布図

(文献 17 の図を鐵鋼スラグ協会にてトレースして作成した)

我が国ではアルカリシリカ反応の問題が顕在化した 1985 年頃に抑制対策の研究が開始され、高炉セメント(高炉スラグ微粉末)使用の有効性が確認された。

図2. は、アルカリシリカ反応性を有する安山岩骨材とアルカリ量を試薬により調整したベースセメントによるモルタルバー長さ変化試験結果の一例である。アルカリ量: 2.0%のベースセメント単味では、材齢 12ヶ月で 0.5%近い長さ変化(膨張)を示すが、高炉スラグ微粉末を 40% 置換することにより、長さ変化を 0.1% 未満に抑制できる。

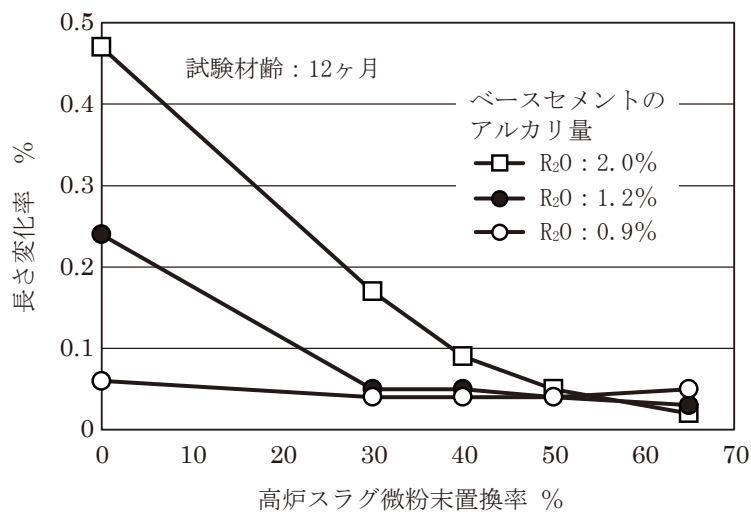


図2. 高炉スラグ微粉末の置換率と長さ変化率
(文献19 から鉄鋼スラグ協会が作図)

高炉セメントがアルカリシリカ反応を抑制する理由は、次のように考えられている。

- ① 高炉セメント硬化体は、普通セメント硬化体より全空隙率が小さく、毛細管空隙の細孔径分布が小径側にあり、アルカリイオン(Na^+ 、 K^+)の拡散や水分の移動が小さい。
- ② 高炉セメントは普通セメントに比べ、アルカリイオンの固定能力が大きい。
- ③ 高炉セメント硬化体中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ がスラグによって消費され、pHが低下しアルカリシリカ反応が生じ難い。

2002年8月1日の国土交通省通達では、アルカリシリカ反応を抑制する方法として、次の3つの対策中のいずれか1つの方法を用いることとしている。なお、土木構造物の場合は①、②を優先する。

① コンクリート中のアルカリ総量の抑制

アルカリ量が表示されたポルトランドセメント等を使用し、コンクリート 1m^3 に含まれるアルカリ総量を Na_2O 換算で 3.0 kg 以下にする。

② 抑制効果のある混合セメント等の使用

高炉セメント(B種またはC種)、あるいはフライアッシュセメント(B種またはC種)、もしくは混和材をポルトランドセメントに混入した結合材で、アルカリシリカ反応抑制効果の確認されたものを使用する。高炉セメントB種の場合、スラグ混合比40%以上、フライアッシュセメントB種の場合、フライアッシュ混合比15%以上であることを、試験成績表で確認する。

③ 安全と認められる骨材の使用

骨材のアルカリシリカ反応性試験(化学法またはモルタルバー法)の結果で、無害と確認された骨材を使用する。

○高炉セメント B 種と高炉スラグ微粉末の併用

再生骨材コンクリートやアルカリシリカ反応性の高い骨材を使用する場合、また、外部飛来塩分や凍結防止剤の影響を受ける構造物の場合には、市販の高炉セメント B 種は、スラグ分量が 40～45%のため十分なアルカリシリカ反応抑制対策にならないことがある。このような場合は、高炉セメント B 種に JIS A6206（コンクリート用高炉スラグ微粉末）で定められた高炉スラグ微粉末を併用してもよい。（文献 20）

○高炉セメント（高炉スラグ微粉末）の再生骨材コンクリートへの利用

近年、廃コンクリートのリサイクルの促進と骨材資源枯渇化を背景として、廃コンクリートから回収した骨材（再生骨材）について、次の JIS 規格が制定されている。

表 1. 再生骨材の JIS 規格

規 格	名 称	骨材に付着するセメントペースト量
JIS A 5021	コンクリート用再生骨材 H	
JIS A 5022	再生骨材コンクリート M	
JIS A 5023	再生骨材コンクリート L	

再生骨材の表面には原コンクリートのセメント分が残存してアルカリ総量が 3.0kg/m^3 を超える可能性があり、かつ、同骨材の産地の特定や反応性骨材の判定が困難な場合があることから、再生骨材 M 及び L を用いるコンクリートには高炉セメントの使用が推奨される。

日本建築学会では、「再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針（案）」を 2014 年 10 月に刊行した。同指針には、再生骨材使用に伴うアルカリシリカ反応対策について、詳しく記載されているので参照されたい。

○アルカリシリカ反応抑制対策の強化

東日本旅客鉄道(株)及び九州旅客鉄道(株)では土木工事標準仕様書を改訂し、対策を強化し、高炉セメントの適用工種を増やした。両社では、使用する骨材の判定種別を 3 段階（有害・準有害・無害）に分類して「無害」骨材の判定を厳しくし、骨材種別に応じた対策を独自に設け、これを実施することとしている。（文献 21, 22）

東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株)では、「設計要領第二集 橋梁保全編」へ新たにアルカリシリカ反応に対する記述を加える改訂を行った。

さらに、東海旅客鉄道(株)でも 2019 年に、アルカリシリカ反応抑制対策を強化する土木工事標準仕様書の改訂を行った。（コンクリート新聞 2019 年 7 月 25 日より）

<アルカリシリカ反応と凍結防止剤散布による複合劣化について>

積雪寒冷地において凍結防止剤の使用が広がり始めた 1990 年代当時より、アルカリシリカ反応への影響が懸念され（文献 23）、その損傷事例も報告されていた。（文献 24）

凍結防止剤の大半は塩化ナトリウムであり、アルカリシリカ反応と塩害の複合劣化が懸念され、また、その使用によってコンクリートにナトリウムイオンが供給されることになり、アルカリシリカ反応が促進される。（文献 10）

凍結防止剤を使用する構造物では、コンクリートのアルカリ総量を Na_2O 換算で 3.0kg/m^3 以下にする対策を講じた場合であっても、アルカリシリカ反応のリスクが生じる可能性がある。

図 3. は、アルカリシリカ反応による構造物の損傷が報告されている地域へ、道路へ凍結防止剤を散布し、かつ、反応性骨材が分布する地域(グレー)を重ねたもので（文献 10）、アルカリシリカ反応と塩害によって、コンクリートが複合劣化する可能性がある地域は、広く分布することが判る。

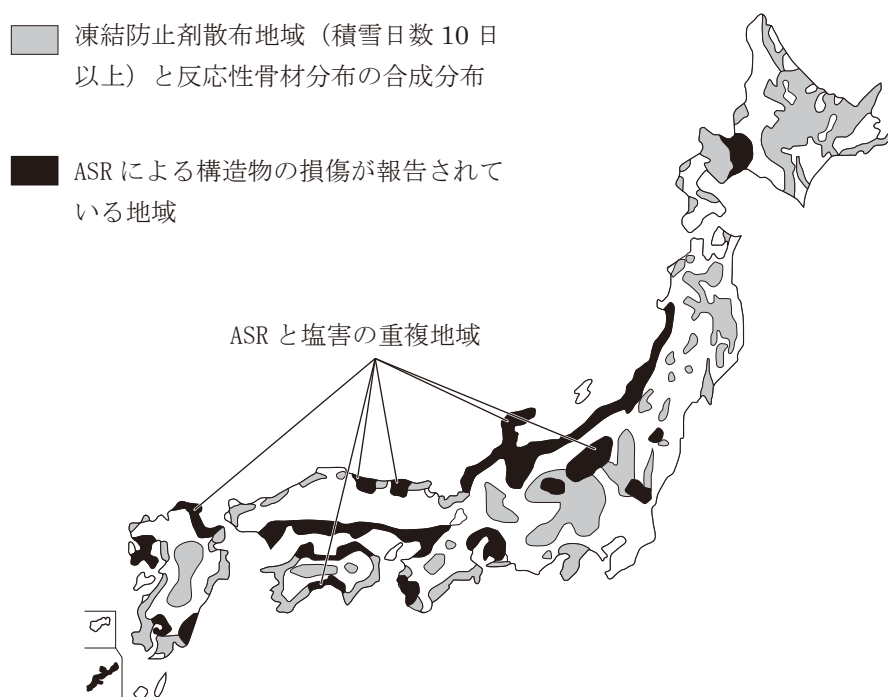


図 3. アルカリシリカ反応と塩害による複合劣化の可能性がある地域
（文献 10 の図を鐵鋼スラグ協会でトレースして作成した）

このような状況下で、国土交通省東北地方整備局では、2016年3月に「設計施工マニュアル（案）[道路橋編]」が改定された。改定の目的は、次のように記述されている。

「積雪寒冷地特有の損傷として、コンクリート構造物の凍害や凍結防止剤の散布による塩害・アルカリシリカ反応、また鋼橋における防食機能劣化・腐食等の損傷事例が報告されており、これらを含めて改訂を行ったものです。改訂にあたっては、維持管理の容易性と確実性及び耐久性の向上に重点を置き、今後さらに増大する橋梁のストックに対して維持管理の軽減等を図ることを目的としております。」(同マニュアル(案)の“はじめに”より)

同マニュアル(案)の第2編 橋梁一般 10章耐久性の「10-6 コンクリート構造物の耐久性向上のための設計・施工上の留意事項」では、セメントに関して、以下のように規定されている。

【 施工上の留意事項 】

(1) 材料および製造

1) セメント

高炉セメント(B種)を基本とする。(PC構造物を除く)

なお、養生期間中の日平均気温が10℃以下となることが予想される場合については、普通ポルトランドセメントの使用も検討できるものとする。この他、温度ひびわれ対策として低熱型ポルトランドセメントの使用事例も出てきているが、これらポルトランドセメントを使用する場合は、使用骨材や使用箇所に十分留意する必要がある。

同マニュアル(案)の実橋への適用例として、RC床板に打設するコンクリートに高炉セメントB種が採用された施工が報告されている。(文献25)

この報告では、高炉セメントB種は初期強度が小さい、自己収縮が大きく硬化初期にひび割れが発生する可能性が高いなどの課題が挙げられていたが、実橋施工に向けた4段階にわたる各種確認試験と実験を行って、高炉セメントコンクリート使用の効果を確認し、課題に対して適用可能と判断され、実橋施工された(橋長:438m)。

また、2014年に創設された国家プロジェクトである戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)で公表された「凍結防止剤散布下におけるRC床版の耐久性確保の手引き(案)」(文献12)では、凍結抑制剤散布下におけるRC床版の設計について、高炉セメントB種などを用いる対策を打ち出している。

4-5. 高炉セメントコンクリートの鋼材腐食

(1) 鋼材の腐食について

コンクリート中の鋼材腐食の照査は、主にコンクリートの中性化について行われていたが、2017年制定のコンクリート標準示方書（設計編）より、新たに「水の浸透」による照査を加え、「中性化」による照査と併記する改訂がされた。この改訂により、「水の浸透」の照査による設計を選択すれば、同一水セメント比において高炉セメント B種と普通ポルトランドセメント（以下、普通セメント）の必要かぶりは、同一となる。

(2) コンクリートの水分浸透速度係数

2017年制定のコンクリート標準示方書（設計編）以降、新たに水分浸透速度係数が導入されている。その予測値 q_p (mm / $\sqrt{\text{時間 (hr)}}$) は、2022年制定のコンクリート標準示方書（設計編）において、式 (1) として定義されている。

$$q_p = 32 \times (W/B)^2 \quad (0.40 \leq W/B \leq 0.60) \quad \text{式 (1)}$$

この予測式は、普通セメント、高炉セメント B種およびフライアッシュセメント B種に共通する式であり、この予測式によって必要かぶりを求めると、高炉セメント B種のかぶりは普通セメントと同じ値となる。

(3) コンクリートの中性化速度係数

コンクリートの中性化速度係数の予測値 α_p は、式 (2) で示される予測式がよく用いられる。この式は土木学会の「フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究（最終報告）」（コンクリートライブラリー64，1988年発行）において実験データに基づいて求められた回帰式である。

$$\alpha_p = -3.57 + 9.0 \times W/B \quad (\text{mm}/\sqrt{\text{年}}) \quad \text{式 (2)}$$

ここに、

$$W/B : \text{有効水結合材比} = W / (C_p + k \times A_d) \quad \text{式 (3)}$$

W : 単位体積当たりの水の質量

B : 単位体積当たりの有効結合材の質量

C_p : 単位体積当たりのポルトランドセメントの質量

A_d : 単位体積当たりの混和材の質量

k : 混和材の種類により定まる定数

コンクリート標準示方書（設計編）は従来から、混和材の種類により定まる定数 k の高炉スラグ微粉末の値は“0.7”とされ、式（3）で算出される「有効水結合材比」が高炉セメントは普通セメントよりも大きくなるため、高炉セメントの方が中性化速度の予測値は大きくなり、これによって算出される必要かぶりも大きくなる。

（4）水分浸透速度係数と中性化速度係数の比較

土木学会の「2022 年制定コンクリート標準示方書改訂資料」（コンクリートライブラリー 162）では、耐用年数：100 年における必要かぶりについて、水分浸透速度係数と中性化速度係数による試算結果として図 1. の比較グラフを示している。

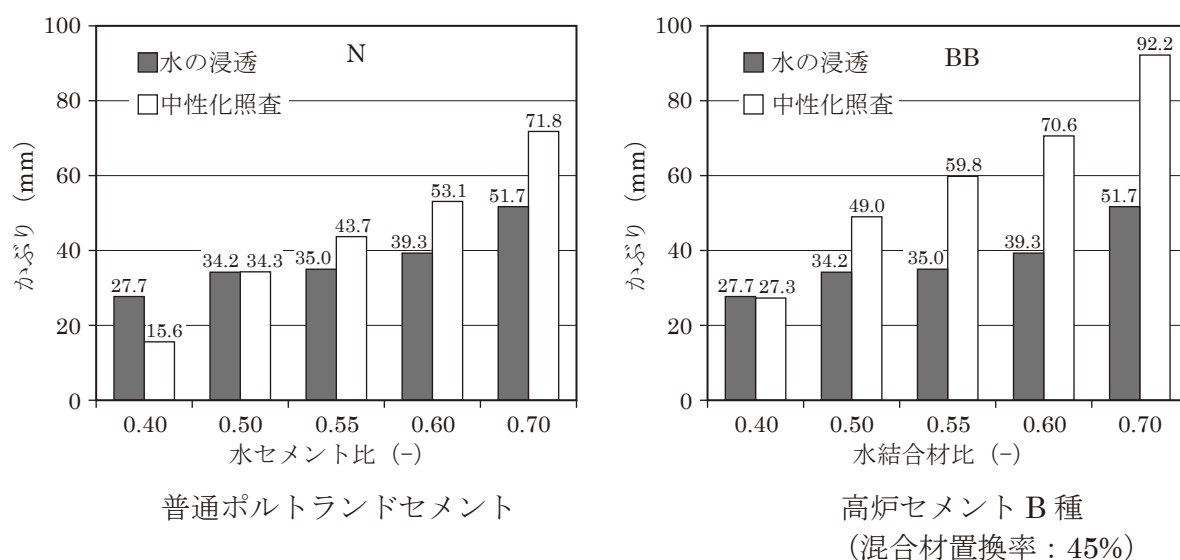


図 1. かぶりの計算結果（設計耐用年数：100年）

水結合材比 55% で比較すると、中性化照査では、高炉セメントは普通セメントに比べかぶりを約 15mm 以上大きくする必要があるが、水の浸透による照査ではセメントの種類に関らず、p30 式（1）を用いて算定するため、高炉セメントと普通セメントは同じかぶりになることが分かる。

実構造物について供用期間87年のコンクリート構造物の鋼材腐食に関する調査結果が報告されている（文献26）。この調査により、鋼材腐食への影響は、「中性化」に比べ「水の浸透」の方が大きいこと、中性化深さが示方書で定義される「腐食発生限界」を超える箇所でもコンクリートの剥離や剥落が生じていないことが報告されている。

NEXCO 中日本では、昨今の温室効果ガス削減の動きを受けて、2023 年 11 月に「環境配慮型コンクリート設計・施工管理要領」を制定した。本要領では、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに比べ CO₂ 排出削減率 40% 以上のものを対象に、混和材を多量に使用するコンクリートの施工上の留意点及び適用範囲が規定されている。「水の浸透」による詳細については、高炉セメント B 種相当の場合、(1) 式の水分浸透速度係数を用いて評価可能であることが記載されている（文献 66）。

(5) 水セメント比の最大値と最少かぶりの標準値について

2012 年制定コンクリート標準示方書(設計編)では、表 1 の様に、設計耐用年数 100 年を想定した一般的な環境下における構造物の最小かぶりの標準値と最大水セメント比が示された。ここでは、一般環境の鋼材腐食の照査は「中性化」のみであったため、適用されるセメントの種類は普通セメントに限定されていた。

しかしながら、2017 年制定コンクリート標準示方書(設計編)より「水の浸透」による照査が加えられたため、高炉セメント B 種とフライアッシュセメント B 種にも普通セメントと同じ値が適用されることとなった。

表 1. 耐久性*を満足する構造物の最少かぶりと最大水セメント比

	W/C の最大値 (%)	かぶり c の最小値 (mm)	施工誤差 Δc_c (mm)
柱	50	45	15
はり	50	40	10
スラブ	50	35	5
橋脚	55	55	15

* 設計耐用年数 100 年を想定

＜土木学会「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針」における中性化速度係数について＞

最近の実構造物（高炉セメント：12箇所, 44検体、普通セメント：15箇所, 46検体）における中性化深さの調査・研究によると、図2. に示すように、水の影響がない場合、水の影響がある場合のいずれにおいても、高炉セメントと普通セメントの差は小さいことがわかる（文献27）。

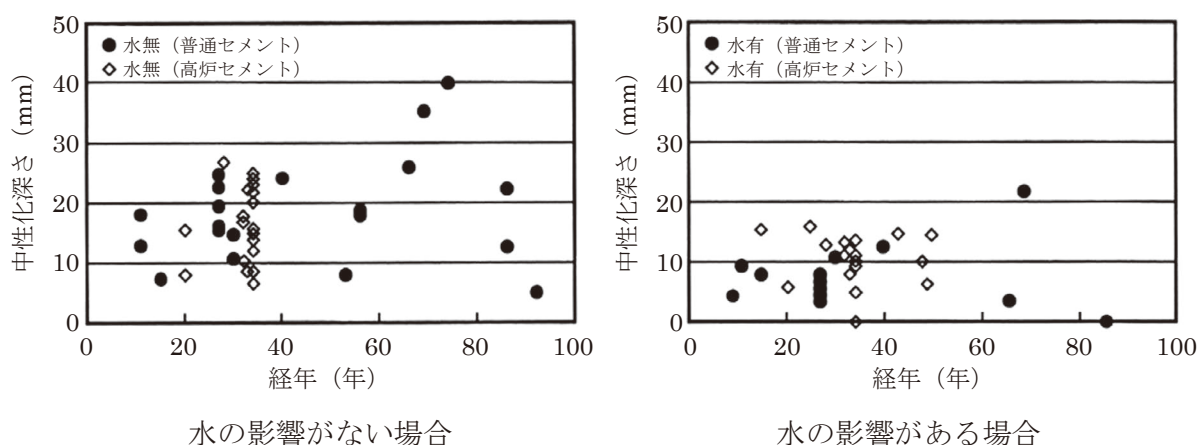


図2. 実構造物における中性化深さの調査結果

このような研究成果を踏まえて、土木学会では2018年に発刊した「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針」（コンクリートライブラリー151）において、「高炉スラグ微粉末の置換率が60%以下の場合、所定のかぶり確保され、かつ所定の養生が行われることを条件に、中性化速度に関しては、普通セメントを用いたコンクリートと同様に扱ってよい。」とし、さらに、中性化速度係数の予測式における有効水結合材比の算出に用いる「混和材の種類により定まる係数： k 」について、高炉スラグ微粉末においては「0.7から1.0の範囲で適切に定めるとよい」と明記された。

$k=1.0$ で中性化速度係数の予測値を求めた場合、高炉セメントの必要かぶりは、普通セメントと同一になる。

<日本建築学会 JASS 5 における中性化に基づく耐久設計基準強度について>

JASS5 改訂版（2022 年 11 月発刊）では、耐久設計基準強度の適用条件が見直された。「2.4 耐久性」によると、一般的な劣化作用を受ける環境を「一般劣化環境（非腐食環境）」と「一般劣化環境（腐食環境）」の 2 種類に区分された。一般劣化環境とは、海水等の影響で鋼材が著しく腐食する特殊な劣化環境ではなく、中性化や水分浸透により腐食する一般的な劣化条件を定義したものである。表 1 に示す様に、「一般劣化環境（非腐食環境）」は、屋内環境の様に鉄筋が腐食しにくい乾燥条件である事を示しており、また、「一般劣化環境（腐食環境）」は屋外や水回りのような湿潤環境にある条件を示している。

表 1. 一般劣化環境（非腐食環境）および一般劣化環境（腐食環境）の例

劣化環境	定義	部位の例	
一般劣化環境 (非腐食環境)	鉄筋の腐食因子が存在しないとみなせる部位	外気に接することのない屋内空間にある部位で、直接の水濡れ、結露などによる水分供給の可能性のない部位	
一般劣化環境 (腐食環境)	鉄筋の腐食因子が存在する部位 一般劣化環境 (非腐食環境) でない部位	常時外気に接する屋外空間にある部位、および土または水に直接接する部位	外壁や外部にあるスラブなど直接雨がかりが想定される部位、および囲われていないピロティや、常時解放された開口を介して外気に触れる駐車場など
		屋内空間にあっても、外皮に接する部位	屋上スラブ・外壁など外皮の屋内側、地下の擁壁や基礎周りの屋内側で、腐食の条件となる水分供給の可能性が否定できない部位
		屋内空間にあっても、水濡れや結露が想定される部位	台所、風呂、トイレ、屋内プールや地下ピットなどを有する室の壁・天井・床など、水濡れや結露などによる水分供給があると想定される部位

耐久設計基準強度は、構造体または部材の計画供用期間の級に応じて特記により、特記が無い場合、表 2 によると規定された。また、「一般劣化環境（非腐食環境）」を設定する部位は特記を行う事とされ、特記が無い場合は「一般劣化環境（腐食環境）」となる。

これにより「一般劣化環境（非腐食環境）」を設定した部位・部材については耐久設計基準強度を設定しない事が規定され、鋼材の腐食は水分の影響が支配的という考え方が基本となった。

また、今回の改定で、新たに混合セメント C 種が規定された事、並びにこれまで長期の場合、これまで、ポルトランドセメントと混合セメント A 種のみ使用可能であったが、混合セメント B 種と C 種も適用できるようになった。

さらに、一般劣化環境（腐食環境）では、短期、標準期、長期において高炉セメント B 種とポルトランドセメントの耐久設計基準強度は同じ値が採用された。

表 2. コンクリートの耐久設計基準強度

	結合材の種類	短期	標準期	長期	超長期
一般劣化環境 (腐食環境)	ポルトランドセメント 高炉セメントA種, A種相当 フライアッシュセメントA種, A種相当	18	24	30	36
	高炉セメントB種, B種相当 フライアッシュセメントB種, B種相当	18	24	30	—
	高炉セメントC種, C種相当 フライアッシュセメントC種, C種相当	24	27	33	—
	エコセメント	18	24	—	—
一般劣化環境(非腐食環境)	設定しない				

日本建築学会「高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の調合設計・施工指針(案)・同解説(2017年改定)」では、高炉スラグ微粉末を普通ポルトランドセメントに混和して用いる場合について、JIS R 5211 に定める高炉セメントの3つの種類であるA種、B種、C種を使用する結合材と同等なものとして、それぞれA種相当、B種相当、C種相当の3つの定義を新たに設けた。これら3つの定義においては、一般的な高炉セメントに材料と品質を合致させるため、使用する高炉スラグはJIS A 6206の高炉スラグ微粉末4000とした。

*上記表中の「相当」は高炉セメントの場合、以下の様に定義されている。

高炉セメントA種相当：普通ポルトランドセメントに加え、JIS A6206に定義する

高炉スラグ微粉末を質量比で20以上30%以下含有する結合材

高炉セメントB種相当：普通ポルトランドセメントに加え、JIS A6206に定義する

高炉スラグ微粉末を質量比で40以上50%以下含有する結合材

高炉セメントC種相当：普通ポルトランドセメントに加え、JIS A6206に定義する

高炉スラグ微粉末を質量比で60以上70%以下含有する結合材

4-6. 高炉セメントコンクリートの水和発熱特性

(1) セメントの水和熱によるコンクリートの温度上昇とひび割れ

温度ひび割れとは、セメントの水和熱に伴うコンクリート温度の一時的な上昇及びその後の降下により、コンクリートに膨張や収縮の変形を生じ、これが内的あるいは外的に拘束される結果、コンクリートに引張応力が作用し、ひび割れが発生する現象である。温度ひび割れは、水和発熱が大きく温度上昇及び降下量が大きいのほど生じやすくなるため、部材厚さの比較的大きいマスコンクリートで生じやすい。また、施工時の外気温が高いほど温度上昇及び降下量も大きくなるので、夏季の施工では特に注意が必要である。

コンクリート温度が上昇する過程では、部材内部は温度が外部より高くなり膨張しようとするが、表面部は膨張が小さいため、表面付近に引張応力が作用する。これにより発生するひび割れを内部拘束ひび割れという。内部拘束ひび割れは、厚いスラブ等で、内部コンクリート温度が最高になる打込み後比較的早い時期に発生することが多い。

コンクリート温度が降下する過程では、コンクリートは収縮し収縮ひずみが地盤や既設コンクリート等に拘束され温度応力が発生する。この温度応力がコンクリートの引張強度より大きい場合ひび割れが発生するが、これを外部拘束ひび割れという。外部拘束ひび割れは、厚い壁等でコンクリート打込み後数日～数週間での発生が多い。

(2) コンクリートの温度上昇に及ぼす要因

① 単位セメント量

コンクリートの温度上昇は、単位セメント量に比例する。一般に、セメント 10kg/m^3 の増減で終局断熱温度上昇量は約 1°C 増減する（文献 28）。

従って、所要の強度、耐久性、ワーカビリティの得られる範囲で単位セメント量をできるだけ小さくするのがよい。

② 打込み時のコンクリート温度

打込み時のコンクリート温度が高いほどセメントの水和反応が促進され、コンクリートの温度上昇量が大きくなる。一般に打込み温度 10°C の増減で、最高温度は $3\sim 5^\circ\text{C}$ 増減する。夏季の施工は特に注意する必要がある。

一般に、コンクリートの温度を $\pm 1^\circ\text{C}$ 変化させるのに必要な各材料の温度変化量は、おおよそセメント $\pm 8^\circ\text{C}$ 、骨材 $\pm 2^\circ\text{C}$ 、練混ぜ水 $\pm 4^\circ\text{C}$ である。（文献 28）

③ 部材の形状・寸法

部材断面寸法の大きいものほどコンクリートの温度上昇量は大きくなる。スラブの場合は厚さ $80\text{-}100\text{cm}$ 以上、下端が拘束された壁の場合は厚さ 50cm 以上のものはマスコンクリートとして取り扱うのがよい。

(3) 温度ひび割れ抑制対策

温度ひび割れを抑制するためには、コンクリートの温度上昇量を小さくするだけでなく、構造物の設計・施工を総合的に考慮したひび割れ抑制対策との併用が必要である。

表1. にその一例を示す。

表 1. 温度ひび割れの抑制対策の一例

項 目	対 策
コンクリートの配合	<ul style="list-style-type: none">・発熱の小さいセメントを使用する（例：低発熱型高炉セメント等の使用）・単位セメント量を小さくする（例：粗骨材の最大寸法を大きくする）・強度管理材齢を長くする（例：56日・91日管理を行う）
打込み温度	<ul style="list-style-type: none">・練り上がり温度を低くする（例：練り混ぜ水・骨材の冷却を行う）
打込み量・間隔	<ul style="list-style-type: none">・1回の打込み区画・リフト高さ・量を小さくする・打込み間隔に配慮する
養生	<ul style="list-style-type: none">・コンクリートの急激な温度変化を避け、乾燥を防ぐ（例：直射日光を遮る、養生期間を長くする、保温性のよい型枠の使用）
設計	<ul style="list-style-type: none">・構造物の形状・寸法に配慮・拘束を小さくする・ひび割れ誘発目地の設置・ひび割れ抑制鉄筋の配置

(4) 低発熱型高炉セメント

低発熱型高炉セメントはコンクリートの水和発熱を低減するため、高炉スラグ微粉末の粉末度を小さくし、セメント中のスラグ分量を高炉セメント B 種の JIS 規格値の上限近くまで増加し、SO₃ 量も一般の高炉セメントより多くし、かつ、高炉セメント B 種の JIS 規格を満足する製品である。(文献 29)

強度発現性は一般の高炉セメントに比べ遅れるため、養生期間を延長する必要がある。

低発熱型高炉セメントは製造するセメント会社によって組成・粉末度等に違いがあり、品質が異なるため、使用に際しては技術資料等により検討し、試験練りを行ってコンクリートの配合を選定する必要がある。

低発熱型高炉セメントの物理試験結果の一例を表 2. に示す。

表 2. 低発熱型高炉セメントの物理試験の一例

	密度	比表面積 (cm ² /g)	凝結		圧縮強さ (N/mm ²)			水和熱 (J/g) ^{**}	
			始発 (min)	凝結 (h)	3日	7日	28日	7日	28日
高炉セメントB種規格値 (JIS R 5211)	—	3000以上	60以上	10以下	10.0以上	17.5以上	42.5以上	—	—
低発熱型高炉セメント (一例)	2.96～ 2.99	3200～ 3350	3-20～ 4-00	4-40～ 5-40	10～ 16	21～ 25	43～ 47	210～ 240	260～ 290
中庸熱セメント規格値 (JIS R 5210)	—	2500以上	60以上	10以下	7.5以上	15.0以上	32.5以上	290以下	340以下

※JIS R 5211高炉セメントでは、高炉セメントにJIS R 5210中庸熱ポルトランドセメントの水和熱の規定を適用する場合は、比表面積及び圧縮強さについても、中庸熱ポルトランドセメントの規定が適用される。

(5) 高炉セメントコンクリートの断熱温度上昇

マスコンクリートの温度ひび割れ発生確率を推定するとき、コンクリートの断熱温度上昇曲線は解析の基本となるもので、一般に次式で示される。

$$Q(t) = K(1 - e^{-\alpha t})$$

$Q(t)$: 材齢 t 日における断熱温度上昇量 (°C)

K : 終局断熱温度上昇量 (°C)、 α : 温度上昇速度の定数、 t : 材齢 (日)

断熱温度上昇曲線は、セメントの種類、単位セメント量、打込み時の気温等が大きく影響するため、施工条件に合わせて試験により求めるのがよい。

温度ひび割れ対策には、終局断熱温度上昇量および温度上昇速度の定数の小さいコンクリートがよい。コンクリートの断熱温度上昇特性について、汎用高炉セメント、低発熱型高炉セメントおよび普通セメントの測定例を図1. に示す。

普通セメントと比べ、高炉セメント B 種は温度上昇速度の定数が若干小さく、断熱温度上昇量はほぼ同程度である。また、低発熱型高炉セメントは温度上昇速度の定数が小さく、断熱温度上昇量は大幅に抑えられている。

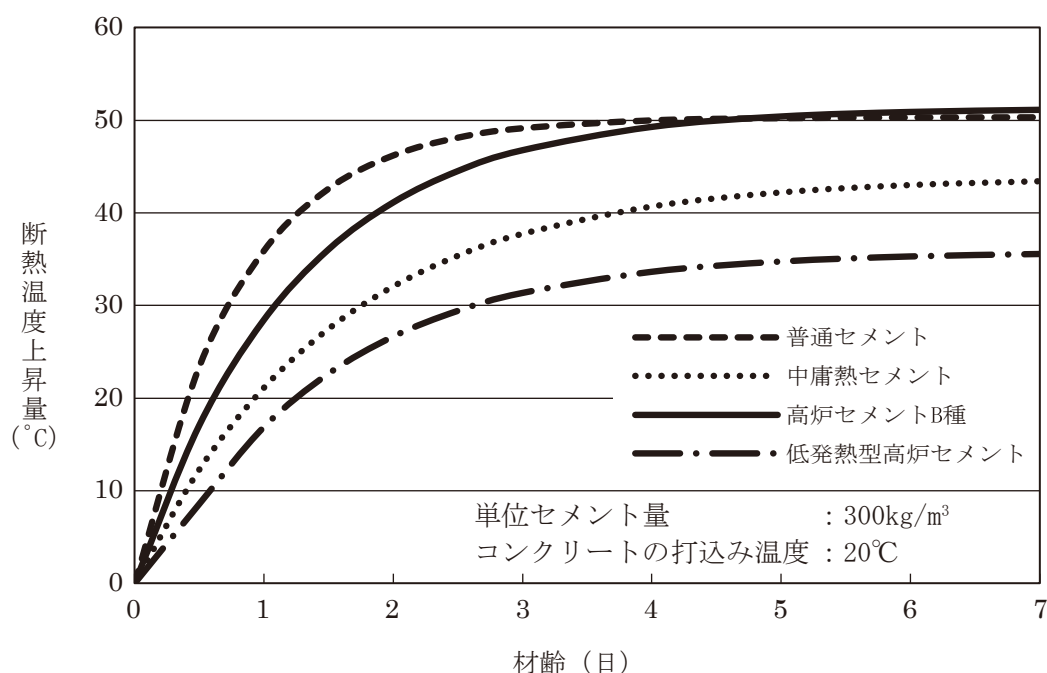


図1. 各種セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇の測定例

(ただし、普通セメント、中庸熱セメントおよび高炉セメントB種は、土木学会コンクリート標準示方書設計編により算出した値。(文献 30) 低発熱型高炉セメントの値は鉄鋼スラグ協会による試験例)

(6) 高炉セメントのマスコンクリートへの使用

- 汎用高炉セメントは普通セメントに比べ温度上昇速度の定数が若干小さく、打込み時のコンクリート温度が低い場合はコンクリートの最高温度が普通セメントより低くなり、温度ひび割れの抑制に有効である。しかし、部材の寸法、環境条件、施工方法等によっては、コンクリートの最高温度が普通セメントと同程度となり、温度ひび割れ抑制に寄与しない場合もある。特に夏場の施工に際しては十分な注意が必要である。
- 高炉セメントは長期強度が大きく伸びる特性があるため、設計基準強度の基準となる材齢が 28 日の場合は、56 日や 91 日に延長することが望ましい。こうすることで、単位セメント量を減らすことができ、結果として発熱量を少なくでき、経済的なコンクリートをつくることができる。
- マスコンクリートの温度ひび割れを少なくする方法の一つに、低発熱型高炉セメントの使用がある。しかし、セメントの種類を替えるだけでは不十分で、先述の表 1. 温度ひび割れの抑制対策と併用することが望ましい。
- 「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針(2018年発刊)」で高炉セメント C 種のデータが示されたため、2022 年制定コンクリート標準示方書(設計編)では、温度応力解析に必要な圧縮強度の推定式や断熱温度上昇式の各定数が、高炉セメント C 種の標準値として追加された。高炉セメント C 種は高炉スラグの分量が多く低発熱型高炉セメントと同様に断熱温度上昇量を低減させる効果があり、温度ひび割れ対策として有効である。

4-7. 高炉セメントコンクリートの収縮

コンクリートの収縮は、拘束された状態では引張応力が生じてひび割れの原因となることがある。ひび割れは、防水性の低下、鉄筋の腐食など構造物の耐久性に影響を及ぼすだけでなく、美観上も好ましくない。従って、コンクリートの収縮を抑制することは、コンクリート構造物の品質確保にあたって重要な課題である。

(1) コンクリートの乾燥収縮

コンクリートの乾燥収縮は、セメントペーストの毛細管空隙中の水が、乾燥環境下において徐々に逸散し、毛細管空隙の収縮に伴って生じる現象で、コンクリート自体の持つ内的条件(使用材料、配合、養生等)や環境条件(湿度、温度、風等)の影響を受ける。

コンクリートの乾燥収縮試験は、JIS A 1129(モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法)により行われる。供試体は、材齢7日まで $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 水中養生の後、基長測定を行い、温度 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ に所定の材齢まで保管する。

一般のコンクリートの材齢26週における乾燥収縮は $300 \sim 1200 \mu$ である。(文献31)

(2) 乾燥収縮に影響を及ぼす要因

① 粗骨材岩種の影響

コンクリート用碎石の岩種は、硬質砂岩、安山岩、流紋岩、石灰岩、玄武岩、花崗岩などがある。コンクリートの乾燥収縮は他の要因に比べ粗骨材岩種の影響が著しく大きく、岩種によっては数百 μ 異なることが報告されている(文献31)。なかでも石灰石碎石は乾燥収縮が他の岩種に比べ比較的小さいといわれている。

② コンクリートの単位水量および水セメント比の影響

コンクリートの乾燥収縮は水の逸散によって生じるため、一般にコンクリートの単位水量が多く(スランプの大きい)、水セメント比の大きいものほど乾燥収縮率は大きくなる傾向がある。

③ セメント種類の影響

従来コンクリートの乾燥収縮は、セメント種類も影響するといわれてきたが、セメント協会において統計解析により検証した結果から、セメント種類の影響は次のように報告されている。

「早強セメントを使用したコンクリートの乾燥収縮率は他のセメントを使用したものより小さくなることが判明した。しかし、普通、中庸熱、低熱、高炉B種を使用したコンクリートの収縮率はいずれも同等となった。」(文献32)

図 1. 及び表 1. に普通セメントと高炉セメントのコンクリートの乾燥収縮試験結果の一例を示す。(文献 33)

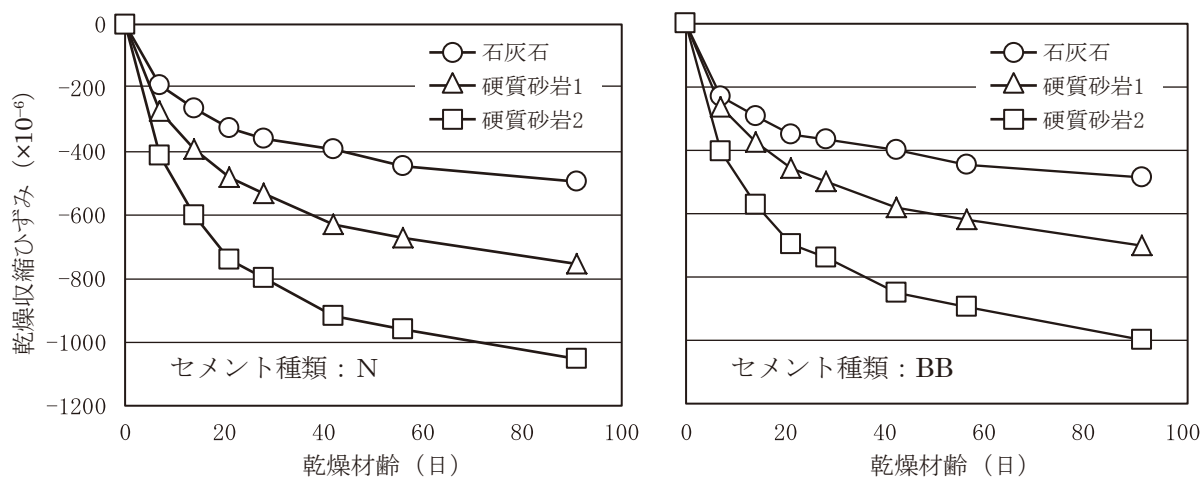


図 1. 粗骨材岩種を変えた場合の乾燥収縮率の一例

表 1. コンクリートの配合条件

W/C (%)	単位水量 (kg/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)
50	170	18±2.5	4.5±1.5

(3) コンクリートの自己収縮

コンクリートの体積変化には、先述の乾燥収縮のほかに自己収縮がある。自己収縮は、セメントの水和反応の進行によってコンクリートの体積が減少し収縮する現象をいう。

水セメント比が 60%程度 of コンクリートの自己収縮量は、乾燥収縮の 1/5～1/10 程度といわれ(文献 34)、通常のコンクリートでは問題にならない。高強度コンクリートや高流動コンクリートのような粉体量が著しく多く、水セメント比が小さいコンクリートでは自己収縮が無視できない程度に大きくなる(文献 35)。

高粉末度の高炉スラグ微粉末を結合材に使用したコンクリートの自己収縮は大きくなる傾向であるが、市販の高炉セメントには、高炉スラグ微粉末 4000 が使用されており、高炉セメントを用いたコンクリートの自己収縮は、普通セメントを用いた場合と同程度である。

4-8. 高炉セメントコンクリートの凍結融解抵抗性

(1) 凍結融解作用を受けるコンクリート

凍結融解作用とは、硬化したコンクリートの内部の水が低温時に凍結し、気温の上昇や日照の影響を受けて融解する現象をいう。コンクリート中の水分が凍結すると、水の凍結膨張(約9%)に見合う水分がコンクリート中を移動し、その際に生じる水圧によりコンクリートの組織が徐々に破壊され、コンクリートは劣化する。

凍結融解抵抗性は、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」によって試験を行い、相対動弾性係数の低下の度合いや耐久性指数によってその良否を判断する。

なお、打込み直後のコンクリートが凍結する場合にも顕著な品質低下を生じるが、これは初期凍害として、別に対策を行う。(P48 (5) 寒中コンクリートの施工 を参照)

(2) 凍結融解抵抗性を高める

コンクリートの凍結融解抵抗性は、連行空気量(エントレインドエア)が大きく影響する。普通コンクリートではAE剤、AE減水剤およびAE助剤を使用して、荷卸し地点での空気量が $4.5 \pm 1.5\%$ に調整されている。空気量が2%以下では、凍結融解抵抗性はほとんど改善されず、6%を超えると強度の低下が大きくなるため、標準的な空気量は練上り時において4~7%程度とするのが一般的である。図1. に高炉セメントコンクリートと普通セメントコンクリートの凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の一例を示す。(文献15)

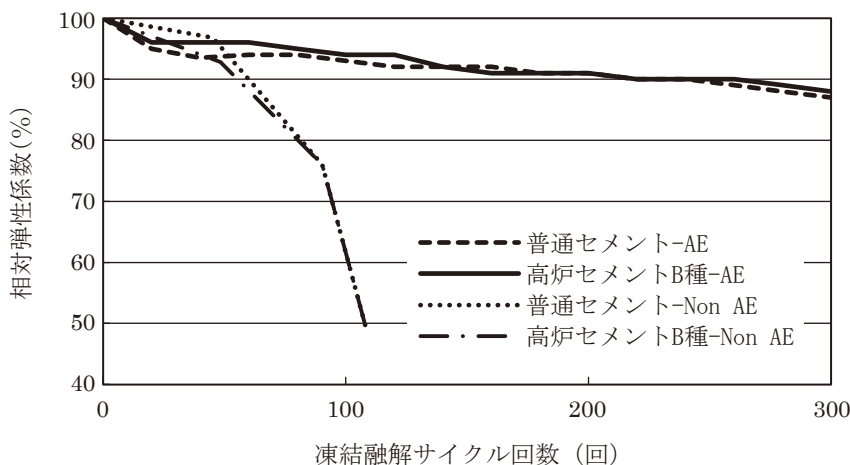


図 1. 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の一例

(3) セメントの種類による耐凍害性の差異

図1. で明らかのように、適切な空気量のAEコンクリートの場合、セメントの種類による耐凍害性の差は無い。日本建築学会「建築工事標準仕様書JASS5」でも、セメントの種類による耐凍害性の相違は考慮する必要は無いことが記されている。

5. 高炉セメントの使用上の留意点

高炉セメントを使用した無筋コンクリート・鉄筋コンクリート構造物は、土木学会「コンクリート標準示方書」や、日本建築学会「建築工事標準仕様書 J A S S 5」等に従って、普通セメントと同じ方法で設計・施工できる。しかし、高炉セメントを使用する場合、次のような配慮が必要である。

(1) 生コンクリートの製造

- ① コンクリートの配(調)合計算を行う際、セメントの密度が普通セメントより小さいのでセメント会社の試験成績表に示された値を用いる。
- ② コンクリートの配(調)合を行う場合、所定のスランプを得るのに必要な単位水量が普通セメントの場合に比べ1～2%程度小さくなる傾向がある。
- ③ 普通セメントに使用される混和材(剤)料は高炉セメントにも使用できるが、使用量や効果が異なる場合があるので、使用に際しては事前に試験により確認する必要がある。A E減水剤を使用する場合、A E助剤の添加量を調整する必要がある。
- ④ 同一呼び強度のコンクリートの水セメント比は、普通セメントに比べ高炉セメントの方が1%程度小さくしている工場が多い。水セメント比を小さくすると、単位セメント量の増加に繋がるが、高炉セメントには ②の性質があるため、単位セメント量は普通セメントと同じか増加しても1～2%程度である。

(2) 施 工

- ① 高炉セメントコンクリートは、養生を十分に行わなければならない。養生が不十分で硬化初期に乾燥すると水和の進行が阻害され、コンクリートの所要の強度が得られないだけでなく、耐久性(凍結融解、鋼材腐食、水密性、耐摩耗性)が損なわれ、ひび割れの原因ともなる。
コンクリートの湿潤養生期間は仕様書等で、一般的に、普通セメントに比べて1～2日長くするように定められている(表1, 表2)。寒中コンクリートの場合は更に養生期間を延長しなければならない。
- ② 高炉セメントは、普通セメントに比べコンクリートの凝結時間が温暖な季節で2時間程度遅延する。施工時期が寒冷期の場合、コンクリートの表面仕上げ時期が遅れる。

(3) 高炉セメントコンクリートの養生

一般に、コンクリートの養生においては、次のような点に留意する必要がある。

- ① コンクリートの打ち込み後、硬化を始めるまで、日光の直射や風等による水分の逸散を防がなければならない。コンクリートの打ち込み後の早い時期に表面が乾燥して内部の水分が失われると、セメントの水和反応が十分に行われず、コンクリートの強度発現が阻害されるとともにひび割れ発生の原因となる。

② コンクリートの表面を荒らさないで作業ができる程度に硬化したら、一定期間、硬化に必要な温度および湿度条件を保ち、コンクリートが振動・衝撃・荷重などの有害な作用を受けないように、保護しなければならない。

養生は、コンクリートの露出面をシート、養生用マット、ぬらした布、むしろ等で覆うか、又は散水、湛水を行い、所定の期間、常に湿潤状態を保たなければならない。

③透水性の小さいせき板で保護されている間は、湿潤養生がされていると考えてよい。

また、型枠を取り外すと一般に湿潤養生が困難な場合が多いので、型枠の取り外し時期は、工期や経済性の許す範囲で遅くするのがよい。

高炉セメントは、普通セメントに比べ水和速度が遅く強度発現が遅れるため、コンクリートの養生期間を延長するとともに上記の養生を入念に行う必要がある。

土木学会「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針」（2018年）の湿潤養生期間の目安を表1.に、日本建築学会「建築工事標準仕様書JASS5」（2022年）の湿潤養生の期間を表2.に示す。

表 1. 湿潤養生日数の目安（土木学会）

高炉スラグ置換率%		0	30-40	40-60			60-70
高炉スラグ微粉末の種類		—	4000	3000	4000	6000	4000
日平均 気温	15℃以上	5日以上	6日以上	7日以上	6日以上	5日以上	8日以上
	10℃以上	7日以上	9日以上	9日以上	8日以上	7日以上	11日以上
	5℃以上	9日以上	12日以上	12日以上	11日以上	9日以上	14日以上

注：普通セメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換した場合の湿潤養生日数の目安。

高炉スラグ置換率0%の日数は、2023年制定コンクリート標準示方書（施工編）に示される普通セメントの標準。

表 2. 湿潤養生の期間（日本建築学会）

計画供用期間の級 セメントの種類	短期 および 標準	長期
	早強セメント	3日以上
普通セメント、 高炉セメントA種・A種相当	5日以上	7日以上
中庸熱および低熱セメント、 高炉セメントB種・B種相当	7日以上	10日以上
高炉セメントC種・C種相当	9日以上	14日以上

(4) 高炉セメントコンクリートの型枠の取り外し

コンクリートの型枠および支保工の取り外しに際しては、コンクリートに損傷を与えないようにできるだけ静かに取り外さなければならない。せき板を取り外すと、コンクリート表面から水分が蒸発するので、取り外し後は、P45の表1. 表2. に示す材齢まで湿潤養生を行わなければならない。

高炉セメントB種および普通セメントを使用したコンクリートの型枠の取り外しができる時期の目安となる日数を表3. に示す。型枠の取り外しの日数は、次に示す土木学会コンクリート標準示方書の値を参考値とした。

- ① 柱・壁・はりの側面の型枠取り外し時の圧縮強度：5 N/mm²
- ② スラブ・はりの底面・アーチの内面の型枠取り外し時の圧縮強度：14 N/mm²

表 3. 5 N/mm² および 14 N/mm² に到達する材齢の目安 (日)

呼び強度	養生温度 5℃		養生温度 10℃		養生温度 20℃	
	5 N/mm ²	14N/mm ²	5 N/mm ²	14N/mm ²	5 N/mm ²	14N/mm ²
21	4 (3)	17 (11)	3 (3)	14 (9)	2 (2)	8 (5)
24	4 (3)	14 (9)	3 (2)	11 (7)	2 (2)	7 (4)
27	3 (3)	11 (8)	3 (2)	8 (6)	2 (2)	6 (4)
30	3 (3)	9 (7)	3 (2)	7 (5)	2 (1)	5 (3)

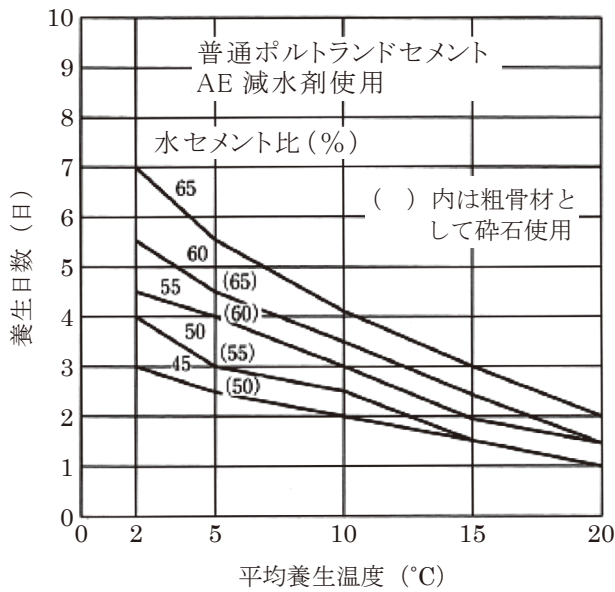
() 内は普通セメント

(鉄鋼スラグ協会 資料)

高炉セメントコンクリートの型枠の取り外しができる日数は低温時においては、普通セメントに比べ5 N/mm²の強度を得るのに1日程度遅れ、14N/mm²に到達する日数は、呼び強度が小さいものほど遅延する。

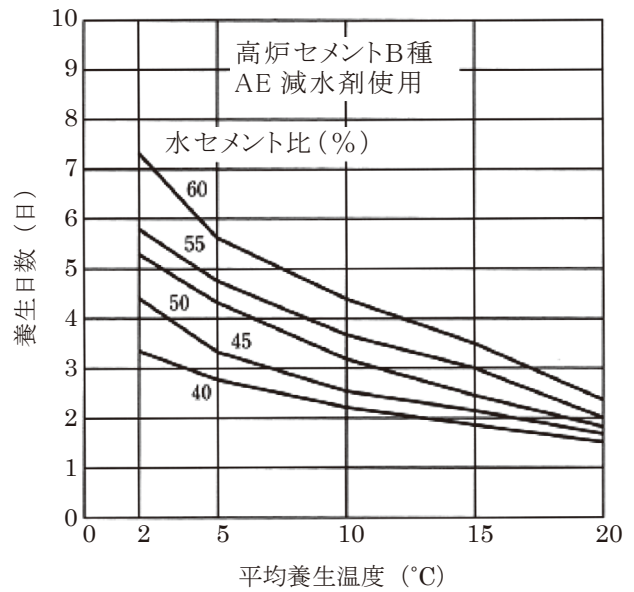
日本建築学会「高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の調合設計・施工指針(案)・同解説(2017年)」には、コンクリートの圧縮強度5 N/mm²が得られる材齢として図1.を掲載している。

図1.の(a)高炉セメントA種は、JASS5の普通ポルトランドセメントのグラフを掲載している。これは、同設計・施工指針(案)では、高炉セメントA種を普通ポルトランドセメントと同等として、JASS5の普通ポルトランドセメントの解説図を引用しているためである。また、図1.に示した(b)高炉セメントB種及び(c)高炉セメントC種の図は、建築工事標準仕様書 JASS 5 (2022年)にも掲載されている。



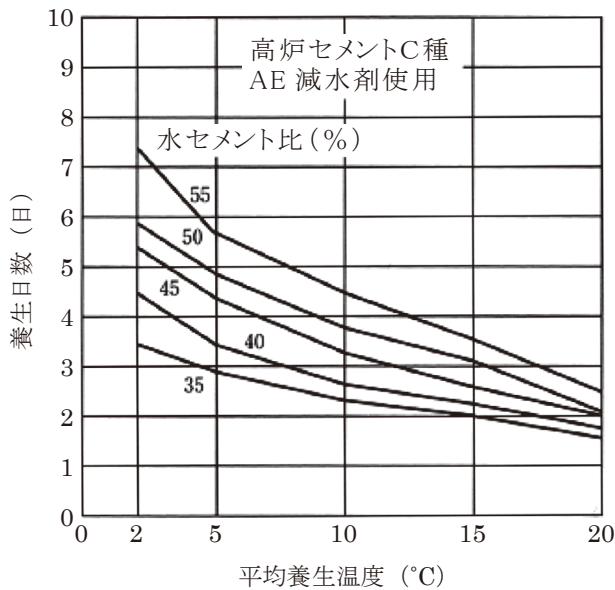
(a) 高炉セメント A 種

日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説
JASS 5 鉄筋コンクリート工事，2015



(b) 高炉セメント B 種

日本建築学会：高炉セメントを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説，2001



(c) 高炉セメント C 種

日本建築学会：高炉セメントを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説，2001

図 1. 圧縮強度 5N/mm^2 が得られる材齢

(5) 寒中コンクリートの施工

日平均気温が4℃以下になることが予想される場合は、寒中コンクリートとして施工を行わなければならない。高炉セメントも基本的には普通セメントの施工と同じで、コンクリートが初期凍害を受けない強度が得られるまで、保温・給熱等により一定温度と湿度を保持し、所要の品質が得られるように、コンクリートの製造・運搬・打込み・養生・型枠等について、適切な処置を取らなければならない。

高炉セメントは普通セメントに比べ、低温の影響を受け易く、コンクリートの発熱量も少ないため強度発現が遅れる。従って、高炉セメントは養生期間を長くする必要がある。

我が国では、殆どの地方で高炉セメントが年間を通じて使用されており、冬季には寒中コンクリートとしての施工が行われている。北海道の土木工事においても、寒中コンクリートの約30%に高炉セメントが使用されていたことが報告されている（文献4）。また、「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」が組織され、高炉セメント利用拡大に向けて積雪寒冷地に対応する技術検討が行われており、北海道の厳寒期に高炉セメントB種のコンクリートを施工した工事事例が報告されている。（文献5）

① 打込み時のコンクリート温度

セメントの種類によらず、コンクリートの温度を20℃以下の範囲でできるだけ高くする。

- 1) 練混ぜ水の温度を高くする → 練混ぜ水の加熱。
- 2) 骨材温度の高いものを使用する → 必要に応じ加熱。
- 3) 早朝・夜間等の低温時の打込みを避ける。
- 4) コンクリートの運搬時の温度低下を防ぐ → 運搬・打込みの時間を短くする。

寒中コンクリートの生コン工場出荷時および打込み時のコンクリート温度は、一般に10℃程度である。

② 型枠・シート・養生マット

- 1) 型枠は、熱伝導率が小さい木製型枠が望ましい。消波ブロック等でメタルフォームの場合は、全体をシートで覆う。
- 2) 型枠を取り外すと湿潤養生が難しいため、脱型時期は遅らすのがよい。
- 3) コンクリートの露出面はシートで覆い、コンクリートを寒気・風から保護する。
- 4) 日最低気温が-5℃程度の場合は、養生マットで覆い、更にその上部をシートで覆う。
- 5) 日最低気温が-5℃以下になるおそれのある場合は、養生マットを2枚使用する。

③ 寒中のコンクリートの養生期間

冬季の厳しい気象作用を受けるコンクリートは初期凍害を防ぐため、寒中コンクリートでは、セメント種類によらず、保温養生や給熱養生を行うのが一般的である。

2017年制定コンクリート標準示方書（施工編）では、初期養生の記述が見直された。養生温度5℃以上に保つのを終了するときの必要強度の標準として表4. が示され、表4. の「(1) しばしば凍結融解を受ける場合」には、その後さらに2日間は0℃以上に保つことを標準とした。さらに、表4. の強度を得るための温度制御養生期間の目安が示されている。（表5.）

なお、表4. 表5. は2023年制定のコンクリート標準示方書（施工編）にも引き続き掲載されている。

表 4. 養生温度を5℃以上に保つのを終了するときに必要な圧縮強度の標準（N/mm²）

5℃以上の温度制御養生を行った後の 次の春までに想定される凍結融解の頻度	断面の大きさ		
	薄い場合	普通の場合	厚い場合
(1) しばしば凍結融解を受ける場合	15	12	10
(2) まれに凍結融解を受ける場合	5	5	5

表 5. 所要の圧縮強度を得る温度制御養生期間の目安（断面の大きさが普通の場合）

5℃以上の温度制御養生を行った後の 次の春までに想定される凍結融解の頻度	養生温度	セメントの種類		
		早強ポルトランド セメント	普通ポルトランド セメント	混合セメント B種
(1) しばしば凍結融解を受ける場合	5℃	5日	9日	12日
	10℃	4日	7日	9日
(2) まれに凍結融解を受ける場合	5℃	3日	4日	5日
	10℃	2日	3日	4日

注) 水セメント比が55%の場合の標準的な養生期間を示した。水セメント比がこれと異なる場合は適宜増減する。

表4, 表5: 土木学会「2017年制定コンクリート標準示方書施工編」

④ 積算温度によるコンクリート強度の推定

構造物のコンクリート温度を測定することにより、積算温度から任意の材齢のコンクリート強度を推定することができる。積算温度は一般に次式で示される。

$$M = \sum (\theta + 10) \times \Delta t$$

M: 積算温度 (°D・D)
 θ : Δt 時間中のコンクリート温度 (°C)
 Δt : 時間 (日)

図 2. に高炉セメントコンクリートの積算温度と圧縮強度の一例を示す。

(例 1) 打込み後 7 日間 5℃養生を行った場合の 7 日圧縮強度の推定値は

$$M = (5 + 10) \times 7 = 105^\circ\text{D} \cdot \text{D}$$

図 2. より、13N/mm²と推定される。

(例 2) 打込み後 7 日間 10℃養生を行った場合の 7 日圧縮強度の推定値は

$$M = (10 + 10) \times 7 = 140^\circ\text{D} \cdot \text{D}$$

図 2. より、16N/mm²と推定される。

(例 3) 材齢 28 日までの平均気温が 0℃の環境下で、給熱養生を行い打込み後 7 日間 10℃を保持した場合の 28 日圧縮強度の推定値は

$$M = (10 + 10) \times 7 + (0 + 10) \times 21 = 350^\circ\text{D} \cdot \text{D}$$

図 2. より、25N/mm²と推定される。

(例 4) 材齢 28 日までの平均気温が 4℃の環境下で、給熱養生を行い打込み後 7 日間 10℃を保持した場合の 28 日圧縮強度の推定値は

$$M = (10 + 10) \times 7 + (4 + 10) \times 21 = 434^\circ\text{D} \cdot \text{D}$$

図 2. より、27N/mm²と推定される。

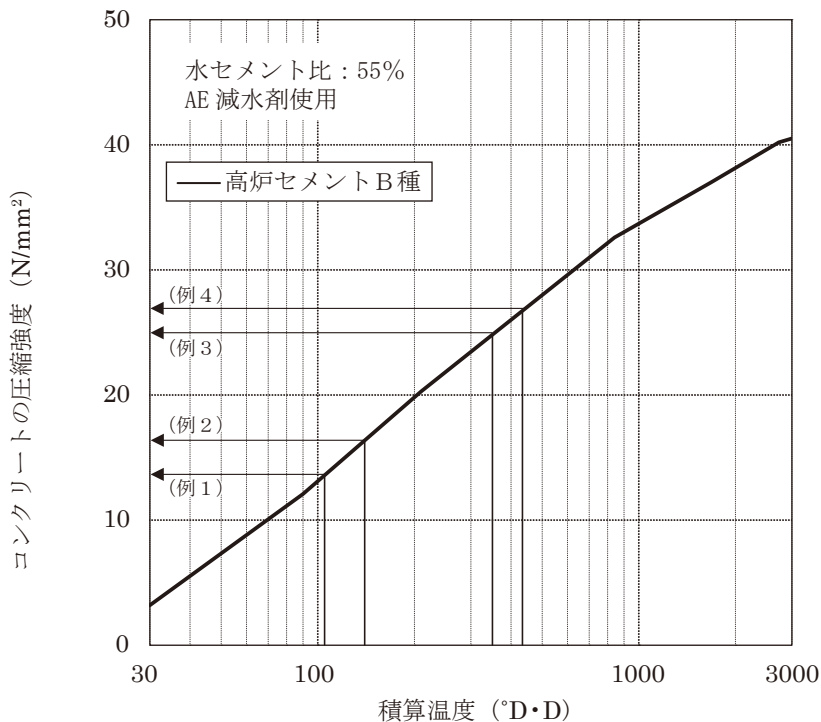


図 2. 高炉セメントコンクリートの積算温度と圧縮強度の一例

(鐵鋼スラグ協会 資料)

(6) 硬化したコンクリート

- ① 同一呼び強度の普通セメントコンクリートに比べ、硬化したコンクリートの諸物性(単位体積質量、弾性係数、乾燥収縮、線膨張係数、クリープ、熱伝導率、比熱等)の差異は小さい。
- ② 凍結融解作用に対する抵抗性は、AEコンクリートで所定の空気量(4.5%程度)を含むコンクリートであれば普通セメントと差はない。
- ③ 高炉セメントコンクリートは型枠(せき板)を取り外した直後、表面が青藍色を呈することがある。これは高炉スラグが還元雰囲気下で製造されるため、含有するFe、Mnの酸化数が小さくなることが原因と考えられる。コンクリートの強度や耐久性には影響なく、大気中で空気酸化されて酸化数が増加し1週間程度で消色する。その後は普通セメントコンクリートより白っぽい色となる。コンクリート内部の青藍色は長期材齢においても消えないことが多い。(文献36)

(7) 強度について

- ① 生コン工場(J I S工場)で製造された高炉セメントコンクリートの材齢28日の圧縮強度は、普通セメントと同じで次の条件を満足するように配(調)合設計されている。
 - a) 1回の試験結果は、購入者が指定した呼び強度の強度値の85%以上でなければならない。
 - b) 3回の試験結果の平均値は、購入者が指定した呼び強度の強度値以上でなければならない。
- ② 建築工事では、構造体コンクリートの強度管理を行うため、高炉セメントについても普通セメントを用いた場合と同様にコンクリートの調合管理強度が①a)、b)の条件を満足しなければならない。

調合管理強度は、品質基準強度に構造体強度補正值(mSn)を加えた値とする。

構造体強度補正值(mSn)は、標準養生した供試体の材齢m日における圧縮強度と、構造体コンクリートの材齢n日における圧縮強度の差で、一般の場合はmを28日、nを91日とする。セメントの種類およびコンクリートの打込みから、材齢28日までの予想平均気温に応じた構造体強度補正值($_{28}S_{91}$)の標準値は、建設省告示第1102号あるいはJASS5(2022年)による。
- ③ コンクリートの材齢7日の圧縮強度から28日の圧縮強度の推定式は、生コン工場で使用する骨材・混和剤・セメント銘柄・呼び強度(配合)等により異なるので、当該工場の推定式を用いる。
- ④ マスコンクリートや高い初期強度が要求されないコンクリートでは、設計基準強度の基準となる材齢が28日の場合は、56日や91日に延長することが望ましい。基準となる材齢を延長することにより、単位セメント量が小さいコンクリートとすることができるため、発熱が小さく、経済的なコンクリートを得ることができる。これは、普通セメントと比べて長期強度が良く伸びる高炉セメントの特徴である。

(8) コンクリート強度の合否の判定

コンクリート強度の合否の判定は、指定した呼び強度の強度値（前述①の a)、b) の条件）を標準養生供試体の強度試験結果が満足すれば合格とする。

(9) コンクリート施工の基本事項の遵守

コンクリート施工の基本事項を現場で確実に実施するため、チェックシートを活用する地道な取り組みがはじめられている。

山口県では、コンクリート構造物のひび割れを抑制する対策を産官学の「協働」の取組として実施している。結果として、実構造物のひび割れを「有害でない」ひび割れに抑制することがシステムとして可能である、というレベルに達し、かつ高炉セメントB種の使用を標準としている。土木学会では、高炉セメントをうまく使いこなした典型的な事例として報告されている（文献 37）。また、この一つの自治体における成功事例を、他の自治体に広めることも検討されている。（文献 38）

具体的には、次のようなPDC Aによって取組まれている。

- ①発注者がコンクリート打ち込み時に立会ってチェックシート（表 6.）により確認
- ②改善すべき点は、改善を指示
- ③チェックシートを集計し、ホームページで公表
- ④発注者・設計者・施工者が課題を共有して、改善

施工の基本を守って施工されたコンクリート構造物は、表層の透気係数が大幅に低下し、吸水抵抗性が向上すること、すなわちコンクリートの表層品質が向上することが確認されている（文献 39）。高炉セメントを使用した構造物のひび割れ発生率は普通セメントよりも低いことも報告されている。（文献 40）

山口県の取組みの成功を受け、橋脚や橋台など鉄筋コンクリート構造物の耐久性を高めるため、国土交通省では東北地方整備局の東日本大震災復興道路・復興支援道路などにおいて、コンクリートの初期欠陥の抑制と表層品質の向上を目的に、現場打ちコンクリートの「施工状況を把握するチェックシート」と、「表層を目視で評価するシート」を用いるコンクリートの品質確保・耐久性確保の取組みが行われた。さらに、2017年には、北海道開発局と内閣府沖縄総合事務局を含む全地方整備局において、この品質向上に向けた取り組みを、橋梁下部（橋台躯体工、橋脚躯体工）とトンネル（覆工コンクリート工）の2工種について、それぞれ1現場以上の試行を開始し（2017年7月25日、日刊建設工業新聞）、18年度には21件の直轄工事で実施された。（2019年10月31日、日本経済新聞電子版） また、同様の取組みは他の自治体へも広まっており、群馬県で適用された他、新潟県、熊本県では試行され、高知県では建設業界の一部の業者において自主的にチェックシートや目視評価が採り入れられている。（2019年10月31日、日本経済新聞電子版、文献 41）

表6. 山口県のチェックシート

R3.10版

記載例 様式3 施工状況把握チェックシート
 【施工状況把握チェックシート(コンクリート打込み時)】

事務所名	〇〇土木建築事務所		工事名	県道〇〇線 道路改良工事 第〇工区				
構造物名	〇〇橋 A1橋台		部位	たて壁	リフト	2		
受注者名	〇〇建設(株)		記入者名	主任監督員 〇〇〇〇				
配合	27-12-20 BB		臨場日時	2021/10/18(月) 8:30~12:00				
打込み開始時刻	予定	9:00	実績	9:10	打込み開始時気温	22.0℃		
					天候	曇のち晴		
打込み終了時刻	予定	11:30	実績	11:45	打込み量(m³)	80		
					リフト高(m)	3.0		
施工段階	チェック項目					事前把握メモ	臨場時メモ	評価
1 2 3 4 5 6 7 8 準備	運搬装置・打込み設備・型枠内は清掃され、コンクリート中にごみ等が混入しないか。							○
	コンクリートと接して吸水するおそれのあるところは、湿らせているか。							○
	硬化したコンクリート表面は、レイタンス等を取り除き、湿らせているか。							○
	型枠内にたまった水は、打込み前に除去しているか。							※1
	かぶり内に、結束線はないか。							○
	コンクリート打込み作業の人員配置(*)は適切か。					打込1, 締固7, 鉄筋1, 型枠1	打込1, 締固7, 鉄筋1, 型枠1	○
	予備のバイブレータを準備しているか。					使用3台 予備1台	使用3台 予備1台	○
	発電機のトラブルがないよう、事前にチェックをしているか。					臨場時に把握した 数値などをメモする。		○
9 運搬	練り混ぜてから打ち終わるまでの時間は適切であるか。					60分を計画	50~60分	○
10 11 12 13 14 15 16 17 18 打込み	ポンプや配管内面の潤滑性を確保するため、先送りモルタルの圧送等の処置を施しているか。							○
	鉄筋や型枠は乱れていないか。							○
	打込み箇所の設定は、型枠内でのコンクリートの横移動が生じないように、目的の位置、あるいは適切な間隔としているか。					2m間隔	2m, 一部5m	※2
	コンクリートは、打込みが完了するまで連続して打ち込んでいるか。							○
	コンクリートの表面が水平になるように打ち込んでいるか。							○
	1層の高さは、50cm以下としているか。					40cm	40cm	○
	2層以上に分けて打ち込む場合、上層のコンクリートの打込みは、下層のコンクリートが固まり始める前に行っているか。							○
	ポンプ配管等の吐出口から打込み面までの高さを1.5m以下として、鉛直に打ち込んでいるか。						1.0m	○
表面にブリーディング水がある場合には、これを取り除いてからコンクリートを打ち込んでいるか。							○	
19 20 21 22 23 24 締固め	棒状バイブレータを下層のコンクリートに10cm程度挿入しているか。					振動部および ホースに目印		○
	棒状バイブレータを鉛直に挿入し、挿入間隔は適切か。(一般に50cm以下)					50cm間隔で 型枠にテープ		○
	棒状バイブレータの振動時間は適切か。(目安は5~15秒)					振動時間8秒、 気泡でも判断	8~10秒	○
	締固め作業中に、棒状バイブレータを鉄筋等に接触させ、振動を与えていないか。					作業時以外は スイッチオフ		○
	棒状バイブレータでコンクリートを横移動させていないか。					養生については、 後日記入する		○
	棒状バイブレータは、穴が残らないように徐々に引き抜いているか。							※3
25 26 27 28 養生	硬化を始めるまでに乾燥するおそれがある場合は、シートなどで日よけや風よけを設けているか。					打込み後 ブルーシート設置	10/18 設置	○
	コンクリートの露出面を湿潤状態に保っているか。					表面養生剤 を塗布	10/18 塗布	○
	湿潤状態を保つ期間は適切であるか。					10日間	10日間	○
	型枠および支保工の取外しは、コンクリートが必要な強度に達した後であるか。					5.0N/mm2	7.5N/mm2	○
要改善事項等	※1 型枠内の一部に水がたまっていたため、打込み前に口頭で注意し、是正された。 ※2 作業足場の制約により、打込み間隔が広い箇所があり、コンクリートの横移動が認められた。次回以降、打込み箇所の目印設置や作業足場の配置を検討するよう、口頭で指示(打合せ簿別途)。 ※3 当初、引き抜きが速く穴が認められたため、口頭で注意し、是正された。							

土木学会コンクリート標準示方書に示される基本事項の中から、山口県では上記の28項目を抽出し、コンクリート施工のチェックを実施している。

参考 1. 鉄鋼スラグ・高炉スラグについて

○鉄鋼スラグの現状

①鉄鋼スラグの生成

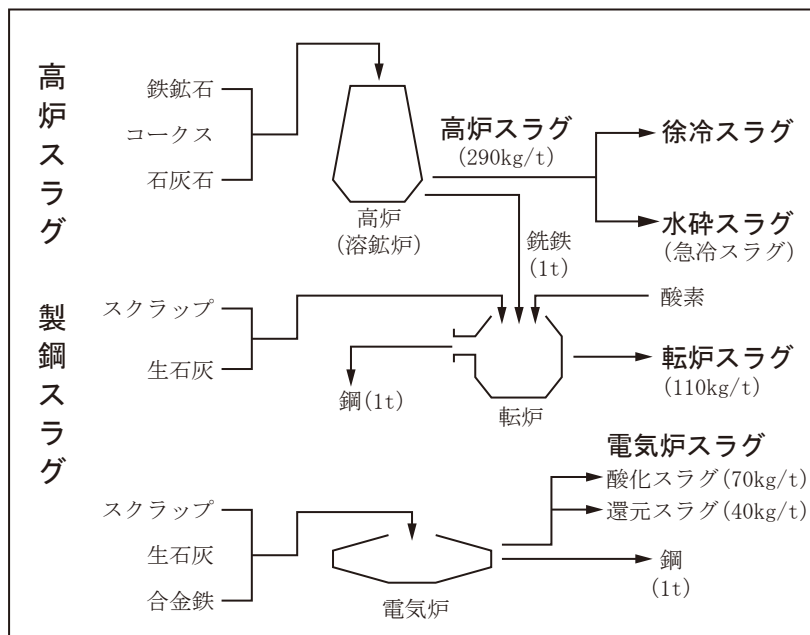


図 1. 鉄鋼スラグ生成の概略

② 鉄鋼スラグの主な用途

表 1. 鉄鋼スラグの主な用途

高炉スラグ	徐冷スラグ	道路用路盤材、コンクリート用粗骨材 セメントクリンカ原料(粘土代替) ロックウール原料、珪酸石灰肥料
	水砕スラグ (急冷スラグ)	高炉セメント原料、コンクリート用高炉スラグ微粉末原料 コンクリート用細骨材、珪酸石灰肥料、土工用
製鋼スラグ	転炉・電気炉スラグ	道路用路盤材、アスファルトコンクリート用骨材 セメントクリンカ原料(鉄原料) 土工用材、地盤改良材、肥料 コンクリート用骨材(電気炉酸化スラグ)

③ 鉄鋼生産量及び鉄鋼スラグ生成量の推移

表 2. 鉄鋼生産量および鉄鋼スラグ生産量の推移

単位:千t

年 度	鉄鋼生産量		高炉スラグ生産量				製鋼スラグ生産量			鉄鋼スラグ 合 計
	粗 鋼	銑 鉄	徐 冷 スラグ	水 砕 スラグ	計	水砕化率 (%)	転 炉 スラグ	電気炉 スラグ	計	
1975	101,613	85,966	25,470	1,872	27,342	6.8	11,368	1,306	12,674	40,016
1980	107,386	84,893	16,723	10,143	26,866	37.8	11,348	2,079	13,427	40,293
1985	103,758	79,253	13,706	11,687	25,393	46.0	9,247	2,500	11,747	37,140
1990	111,710	80,835	10,514	15,234	25,748	59.2	10,236	2,807	13,043	38,791
1995	100,023	74,637	8,732	14,748	23,479	62.8	10,439	3,549	13,988	37,467
2000	106,901	80,701	6,625	16,874	23,498	71.8	10,640	3,467	14,107	37,605
2005	112,718	82,937	4,928	19,830	24,758	80.1	9,933	3,494	13,427	38,185
2010	110,792	82,915	5,085	19,839	24,924	79.6	10,737	2,737	13,474	38,398
2015	104,229	80,535	4,376	19,686	24,062	81.8	11,614	2,624	14,238	38,300
2020	82,784	60,777	2,659	16,356	19,015	86.0	8,830	2,451	11,280	30,295

水砕化率 % = 水砕スラグ/高炉スラグ計

副産物として年間に生成する鉄鋼スラグは、高炉で銑鉄を生産する際に発生する高炉スラグが約 1,900 万 t と、転炉および電気炉で鋼を生産する際に発生する製鋼スラグが約 1,100 万 t で、その合計量は約 3,000 万 t にのぼり、これまでほぼ全量が有効に利用されてきた。

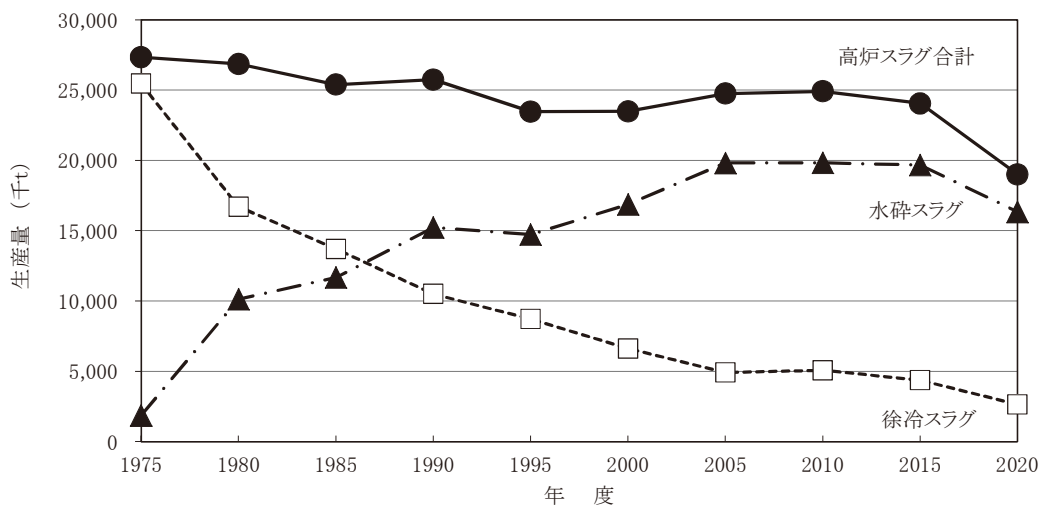


図 2. 高炉スラグ生産量の推移

○高炉スラグの現状

① 高炉スラグの製造方法とその性質

鉄鉱石中の鉄以外の成分は、副原料の石灰石やコークス中の灰分と共に高炉スラグとして回収され、その主な化学成分は CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 および MgO で、普通セメントと類似している。この高炉スラグは銑鉄 1 t 当たり約 290 kg 生成する。

高炉スラグは、高炉から取り出した高温の熔融スラグを大気中で自然冷却する徐冷スラグと、圧力水で急激に冷却する水砕スラグ（「急冷スラグ」ともいう）があり、現在の生産比率は水砕スラグが約 85% で徐冷スラグが約 15% である。

徐冷スラグと水砕スラグの化学成分は同一であるが、外観・物理的性質・化学的性質および鉱物的性質は全く異なる。

徐冷スラグは、結晶質の塊状で天然岩石と同じような性質を持ち、砕石工場で破碎・粒度調整したものが主に道路用路盤材、コンクリート用粗骨材等に使用されている。

水砕スラグは、ガラス質(非晶質)の粒状で水硬性を有し、これを粉砕した高炉スラグ微粉末はセメント等のアルカリ刺激材が共存すると、スラグそのものがセメントと同じような水和反応をして硬化・強度発現する性質(潜在水硬性という)がある。

水砕スラグは、このような性質を利用して高炉セメントやコンクリート用混和材料の原料としての利用が多い。また、一部はコンクリート用細骨材や土工用の砂としても使用されている。

我が国の製鉄所で使用している鉄鉱石の品位および高炉の操業方法に大きな違いはないため、水砕スラグの品質の差は小さく、殆どが高炉セメントの原料として利用することができる。高炉スラグの化学成分の一例を表 1. に示す。

表 1. 高炉スラグ化学成分の一例

単位:%

化学成分	高炉スラグ	(参 考)		
		普通セメント	高炉セメントB種	安山岩
SiO_2	33.8	21.1	25.3	59.6
Al_2O_3	13.4	5.2	8.5	17.3
Fe_2O_3	0.4	2.8	1.9	3.1
CaO	41.7	64.2	55.8	5.8
MgO	7.4	1.5	3.0	2.8
SO_3	0.8*	2.0	2.0	—

*は硫化物Sのみの数値

② 高炉スラグの用途別使用高

2022年度の高炉スラグの用途別使用高を図1. に示す。

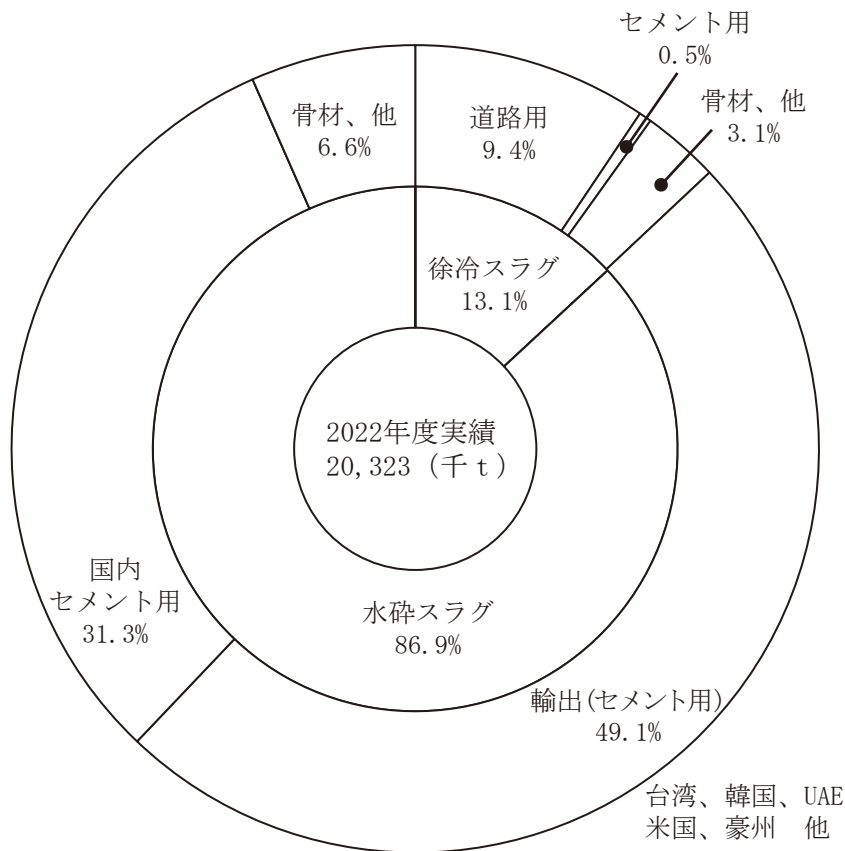


図 1. 高炉スラグの用途別使用高
(鐵鋼スラグ協会 資料)

図1. のように、高炉スラグは様々な用途へ出荷されている。最大の需要分野はセメント向けであるが、近年、国内セメント需要の減少により、国内セメント向け出荷数量は鈍化傾向にある。また、第二の需要分野である道路向けも、道路建設の減少と廃コンクリートリサイクル材使用の増加に伴い減少している。他方、海外のセメント向け輸出も年間1,000万t規模に達している。従って、今後、国内の高炉セメント需要増加に対しては、例えば、他向け先への出荷調整等によって、十分な供給量が確保できると考えている。

参考 2. 高炉スラグ微粉末について

(JIS A 6206 コンクリート用高炉スラグ微粉末)

○高炉スラグ微粉末のコンクリート用混和材としての利用

高炉スラグのセメントへの利用は、我が国や欧州では高炉セメントとして普及したが、アメリカ・カナダ・イギリス・南アフリカ・台湾・韓国・シンガポールなどでは、生コン工場でコンクリート用混和材としての利用が多い。

我が国の高炉スラグ微粉末は、表 1. に示す会社で生産されており、表 2. に示すように大部分が高炉セメント原料に使用されているが、一部はコンクリート用混和材としても使用されている。

高炉スラグ微粉末は、JIS A 5308(レディーミクストコンクリート)、学協会・官公庁等の仕様書にも混和材料として規定されている。さらに、温室効果ガス実質ゼロに向け、建設会社各社で開発が進められている低炭素型コンクリート（文献48, 49）には、結合材の大半を高炉スラグ微粉末が占めるものが多く、今後の社会実装が期待されている。

表 1. 高炉スラグ微粉末会社の製品

製 造 会 社	製 造 品 種				高 炉 ス ラ グ	
	3000	4000	6000	8000	主 要 供 給 製 鉄 所	
日 鉄 セ メ ン ト (株)		○	○		日本製鉄(株)	室蘭
日鉄スラグ製品(株)鹿島工場		○			〃	鹿島
日鉄スラグ製品(株)君津工場	○	○			〃	君津
日鉄スラグ製品(株)名古屋工場		○	○		〃	名古屋
和歌山高炉セメント(株)		○			〃	和歌山
日鉄高炉セメント(株)	○	○	○	○	〃	八幡
(株) デ イ ・ シ イ	○	○	○	○	JFEスチール(株)	千葉
千葉リバーメント(株)		○			〃	千葉
水島リバーメント(株)		○			〃	倉敷
(株) 神 戸 製 鋼 所		○			(株)神戸製鋼所	加古川

(2024年4月現在)

表 2. 高炉スラグ微粉末の用途別販売高

単位：千t

用 途	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
セメント用	3,404	3,126	3,280	3,145	3,007
コンクリート用	271	274	227	241	249
建材他	282	168	280	278	306
合 計	3,957	3,568	3,787	3,664	3,562

(鐵鋼スラグ協会 資料)

高炉スラグ微粉末の品質は、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。同規格は2013年に改正され、温度ひび割れ対策として高炉スラグ微粉末4000より比表面積が小さい製品のニーズが増えていることから、新たに高炉スラグ微粉末3000が加えられた。表3. に品質規格値を表4. に品質実績を示す。

表3. 高炉スラグ微粉末の品質 (JIS A 6206)

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			
比 表 面 積		cm ² /g	2 750 以上	3 500 以上	5 000 以上	7 000 以上
			3 500 未満	5 000 未満	7 000 未満	10 000 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		90 以上	85 以上
酸 化 マ グ ネ シ ウ ム		%	10.0 以下			
三 酸 化 硫 黄		%	4.0 以下			
強 熱 減 量		%	3.0 以下			
塩 化 物 イ オ ン		%	0.02 以下			

注1) 高炉スラグ微粉末の原材料とする高炉水砕スラグは、塩基度が1.60以上のものを用いる。

$$\text{塩基度} = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$$

2) 活性度指数とフロー値比の試験は、高炉スラグ微粉末の置換率を50%で行う。

表4. 高炉スラグ微粉末の品質実績例 (2015年度)

		密度 g/cm ³	比表面積 cm ² /g	活性度指数 (%)			フロー値 比 (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	強熱 減量 (%)	塩化物 イオン (%)	JIS 塩基度
				7日	28日	91日						
3000 せっこう有	Max	2.89	3410	—	81	94	99	5.1	3.9	1.9	0.008	1.90
	Min	2.89	3280	—	74	90	98	4.8	3.5	1.5	0.006	1.79
	Ave	2.89	3351	—	76	92	98	4.9	3.7	1.6	0.007	1.83
4000 せっこう有	Max	2.90	4880	82	109	121	104	7.3	2.2	1.3	0.009	2.01
	Min	2.86	4240	64	85	98	95	4.9	1.5	0.5	0.002	1.78
	Ave	2.88	4463	72	96	108	99	6.0	1.9	0.9	0.005	1.86
4000 せっこう無	Max	2.91	4490	79	109	125	107	7.4	0.4	0.8	0.008	1.93
	Min	2.87	4010	57	87	105	95	5.0	0.0	0.0	0.001	1.80
	Ave	2.91	4251	69	97	116	100	5.9	0.0	0.1	0.004	1.86
6000 せっこう有	Max	2.91	6100	104	117	—	99	5.6	3.2	0.7	0.007	1.89
	Min	2.89	5790	85	104	—	93	5.2	2.9	0.0	0.002	1.80
	Ave	2.90	5986	98	113	—	98	5.5	3.0	0.4	0.004	1.84
6000 せっこう無	Max	2.91	6500	98	115	—	101	6.4	0.1	0.5	0.008	1.96
	Min	2.91	5860	75	106	—	94	5.6	0.0	0.0	0.001	1.82
	Ave	2.91	6248	88	112	—	98	6.0	0.0	0.2	0.005	1.86
8000 せっこう有	Max	2.90	8060	114	115	—	99	5.7	3.3	0.5	0.004	1.85
	Min	2.90	8010	111	113	—	97	5.2	2.9	0.3	0.003	1.84
	Ave	2.90	8039	112	114	—	98	5.4	3.1	0.4	0.003	1.84
8000 せっこう無	Max	2.91	8600	108	119	—	96	6.4	0.1	0.4	0.007	1.90
	Min	2.91	7520	98	108	—	88	5.6	0.0	0.1	0.004	1.84
	Ave	2.91	8467	102	114	—	92	6.1	0.0	0.2	0.006	1.87

(鐵鋼スラグ協会会員各社の試験成績表の集計値)

高炉スラグ微粉末の混和材としての使用は、耐久性・発熱性・強度発現性などの目的に応じて、ポルトランドセメントの種類、高炉スラグ微粉末の種類及び置換率をコンクリート製造工場で任意に選択できるので合理的である。

○高炉スラグ微粉末 3000 の特性

高炉スラグ微粉末 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ったものであるが、コンクリート混和材としても使用されることから、これを使用したコンクリートの特性について紹介する。高炉スラグ微粉末 4000 を使用したコンクリートと大きな違いは無いが、概ね以下のとおりである。

① 調配合及びフレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状は、以下のとおりである。

- 1) 高炉スラグ微粉末 4000 と比べ、同一スランプとなる単位水量は同程度である。
- 2) 普通セメントと比べ、ブリーディング率は同程度である。

② 断熱温度上昇 (図 1.)

高炉スラグ微粉末 4000 に比べて断熱温度上昇は小さく、発熱抑制効果が向上する。高炉スラグ置換率 40%程度では、高炉スラグ微粉末 3000 と高炉スラグ微粉末 4000 との断熱温度上昇の差は小さいが、高炉スラグ置換率の増加とともに両者の差は拡大する。

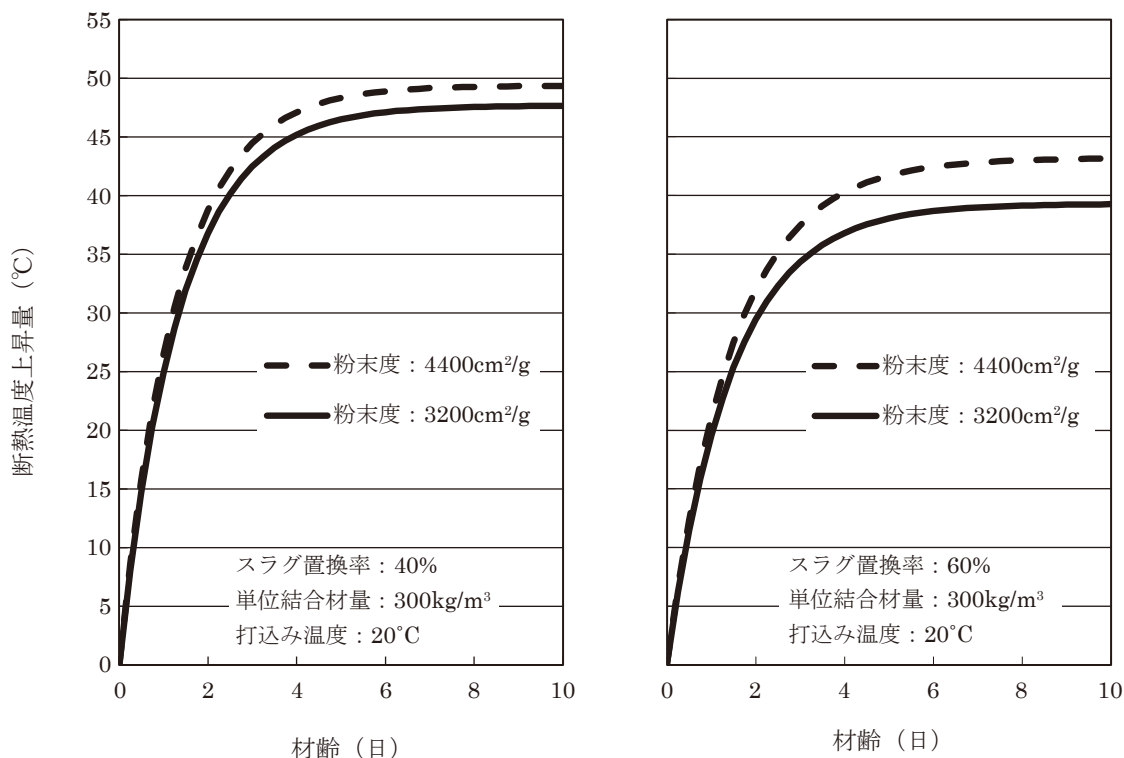


図1. 断熱温度上昇量測定結果の一例 (鐵鋼スラグ協会 資料)

③ 強度発現性 (図 2.)

高炉スラグ微粉末 3000 は同一の高炉スラグ置換率において高炉スラグ微粉末 4000 に比べて強度発現が遅れるが、材齢 91 日の活性度指数は 100%程度になる。

高炉スラグ微粉末 6000, 8000 の活性度指数は、材齢 28 日以降増進が小さくなる。

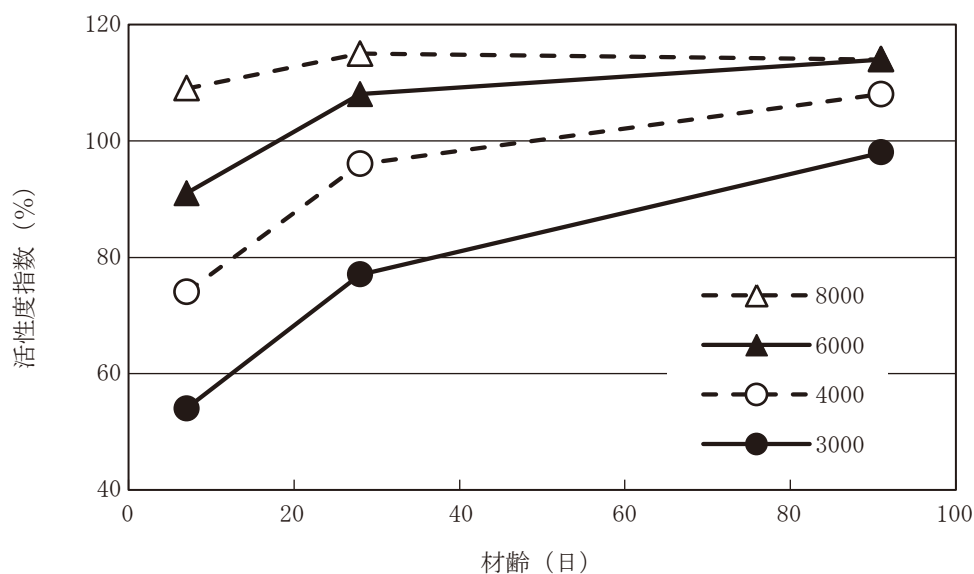


図 2. 強度発現性 (高炉スラグ微粉末種類別の活性度指数 鐵鋼スラグ協会資料)

○高炉スラグ微粉末使用による二酸化炭素の削減

ポルトランドセメントを製造する際に発生する二酸化炭素は約 760 kg/t であるのに対して、高炉スラグ微粉末は約 40 kg/t と著しく小さい(文献 42)。

これらの数値を用いて、単位結合材量 350 kg のコンクリートについて結合材に起因する二酸化炭素排出量を試算した一例を表 5. に示す。

結合材に起因する二酸化炭素排出量は、スラグ置換率とほぼ同程度減少する。

表 5. 高炉スラグ微粉末の置換率と結合材に起因する二酸化炭素排出量の一例

スラグ置換率		0%	20%	30%	40%	50%	70%
ポルトランドセメント kg/m ³		350	280	245	210	175	105
高炉スラグ微粉末 kg/m ³		0	70	105	140	175	245
結合材からの CO ₂ 排出量 kg/m ³	セメント起因	266	213	186	160	133	80
	スラグ起因	0	3	4	6	7	10
	合計	266	216	190	166	140	90
CO ₂ 削減率 %		0	19	29	38	47	66

○高炉スラグ微粉末の普通コンクリート・コンクリート製品使用実績例

表6. 高炉スラグ微粉末の使用実績例

構造物／製品	高炉スラグ 微粉末	セメント種類	スラグ 置換率	使用実績
RCセグメント	4000	普通セメント	50%	東京湾横断道路 江戸川外郭放水路 首都高速中央環状新宿線 東京電力東京湾海底ガス管・他
ダム堤体	4000	中庸熟セメント	55%	関西電力長谷ダム
普通 コンクリート	4000	普通セメント	40%	中部国際空港（エプロン舗装・ 建築基礎・連絡橋・他）
高流動 コンクリート	4000	普通セメント	20～50%	各種コンクリート製品 （但し、即脱製品を除く）
	6000	普通セメント	70%	神戸港沈埋函
プレストレスト コンクリート	4000	早強セメント	30%	地方自治体、国土交通省、他
	6000		50%	国土交通省、NEXCO、他 約300橋梁
各種 コンクリート 製品	4000 6000	普通セメント 早強セメント	20～50%	ボックスカルバート、アーチカル バート、L型擁壁、コンクリート 矢板、パイル・ポール、ILB、空洞 ブロック、C・C・BOX、道路用製品、 各種側溝、ます類・他

高炉スラグ微粉末 6000 は、早強セメントと組合せて使用することにより、早期材齢で高強度が確保でき、コンクリートの塩害対策（飛来塩分や凍結防止剤の散布による）に有効であるため、プレストレストコンクリート用混和材として、橋梁の桁・床版及びタンク等に使用されている。（文献 43）

<高炉スラグ微粉末使用についての参考文献>

- ① 日本建築学会「高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針（案）・同解説」2017年9月
- ② 土木学会 コンクリートライブラリー151「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針」2018年9月
- ③ 土木学会 コンクリートライブラリー152「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案）」2018年9月
- ④ 日本コンクリート工学協会「プレキャストコンクリート製品の設計と利用研究委員会」報告書 2009年8月
- ⑤ 全国生コンクリート工業組合連合会編「高炉スラグ微粉末使用コンクリート製造マニュアル」1998年7月

参考 3. 高炉セメントから派生した技術（製品）

詳細は当協会ホームページの「高炉セメント百年史」をご覧ください。

URL : <https://www.slg.jp/publication/pamphlet.html>

○低発熱型高炉セメント

低発熱型高炉セメントは、高炉スラグの粉末度、混合量および石こう量をコントロールすることにより、コンクリートの断熱温度上昇量を抑制する効果を付加した新型の高炉セメントB種で、JIS R 5211 の高炉セメントB種に適合するとともに、グリーン購入法特定調達品目に該当する。

○超高強度・高流動用混合セメント

原料に普通セメント、スラグ石こう系混和材、シリカフェームを使用した超高強度・高流動コンクリート用に開発された混合セメントで、80～150N/mm² 程度までの幅広い範囲の超高強度・高流動コンクリートをつくることができる。

○高炉スラグ系注入材

超微粒子の高炉スラグ微粉末を主原料とした無機系注入材で、ダムの基礎地盤処理やトンネル掘削時の止水・補強、細砂地盤の液状化防止、地下石油備蓄基地の止水など幅広い注入工事に用いられる。

○無収縮グラウト材

高炉セメントの特徴を最大限に活かした、流動性保持時間の長い高流動無収縮グラウトで、水平流動性に優れ自己流動により小間隙の隅々まで充填可能な製品。

○セルフレベリング材

高炉セメントB種を使用した、材料分離抵抗性が高く、流動性保持時間が長く、高い平滑度と高強度が得られるモルタル。

○セメント系固化材

高炉スラグを原料に使用した固化材は、エトリンガイトの生成による脱水効果や改良土の強度改善効果が高く、改良土からの六価クロムの溶出が少ない。

本冊子 p.8 「2（4）高炉セメントの地盤改良工事への利用」もご参照ください。

参考 4. コンクリートのカーボンニュートラル技術

2050年のカーボンニュートラルを実現するため、建設会社各社ではセメント製造に起因するCO₂排出量の削減を目的に、各種混和材を使用した低炭素コンクリートの研究開発や普及を推進しています。

こうした取り組みは、建設部門からのCO₂排出量を抑制すると同時に、混和材の種類や添加量を適宜調整することでコンクリートに新たな性能を付加させることもできます。

ここでは、高炉スラグ微粉末を使用した各種低炭素コンクリートの概要を紹介します。

表 1. 建設会社各社の低炭素コンクリートの概要（順不同）

名称	実施建設会社	概要
T-eConcrete (文献50～54)	大成建設	高炉スラグ微粉末を用いてセメント・ゼロ型、フライアッシュ活用型、建築基準法対応型およびCarbon-Recycleの4タイプがあり、場所打ちコンクリート、プレキャストコンクリート、構造物の種類や使用条件に応じて様々なラインナップがある。
サステインクリート (文献55～56)	三井住友建設	普通ポルトランドセメントへ高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフェームの混合割合を変化させ、強度や粘性を調整して製造するコンクリート。ラインナップには、セメント無添加型もある。
スラグリート (文献57～58)	西松建設、戸田建設	セメントに対して高炉スラグ微粉末を70～90%置換するコンクリートで、早強ポルトランドセメントを使用する場合もある。 *日本建築総合試験所 GBRC材料証明第20-01取得
クリーンクリート (文献59)	大林組	高炉スラグ微粉末の置換率は60%以上のコンクリートで、他にフライアッシュやシリカフェームを混合する場合もある。コンクリート分野で初のJ-クレジットの認証を受けた実績もある。 *日本建築センター 建設技術審査証明 BCJ-202取得
ECMセメントコンクリートシステム (文献60)	日本スラグセメント・コンクリート技術協会（竹中工務店、鹿島建設、大林組、清水建設、大成建設、安藤ハザマ、佐藤工業、戸田建設、西松建設、長谷工コーポレーション、フジタ、前田建設工業、富士ビーエス）	高炉セメントC種のJIS規格の範囲で、各種材料構成を最適化する事で初期強度増進と収縮低減を図る。また、スランプロス低減のため専用の化学混和剤を使用。 *日本建築総合試験所 GBRC材料証明第13-11改2取得
CELBIC（環境配慮型 BFコンクリート） (文献61～62)	CELBIC研究会（長谷工コーポレーション、青木あすなろ建設、浅沼組、安藤ハザマ、奥村組、熊谷組、鴻池組、五洋建設、銭高組、鉄建建設、東急建設、東洋建設、矢作建設工業）	生コン工場で普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を製造し混合しコンクリートの施工部位に応じて、高炉セメントA種相当、B種相当及びC種相当を製造。 *日本建築総合試験所 GBRC材料証明第20-04取得
ローカーボンハイパフォーマンスコンクリート (文献63～64)	安藤ハザマ	普通ポルトランドセメント：高炉スラグ微粉末：フライアッシュ=6：2：2の3成分系セメント。中庸熱セメントと同程度のひび割れ抵抗性を有する。
H-BAコンクリート (文献65)	長谷工コーポレーション	生コンクリート工場で普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種を混合して製造する高炉セメントA種相当のコンクリート。 *日本建築総合試験所 GBRC材料証明第17-21号改1取得

おわりに

高炉セメントは本冊子の中で紹介いたしましたように、CO₂削減・省資源・省エネルギー等の環境負荷低減型セメントとして評価され、グリーン購入法をはじめとする国・地方公共団体等の諸施策に取上げられています。

しかしながら、現状では、高炉セメントの用途は土木分野が中心で、幅広く使用されているとはいえません。国も、より広い用途で高炉セメントの使用について、ポテンシャルの調査・検討を行なっています。さらに、開発が進められている低炭素型コンクリートは、温室効果ガス実質ゼロに向け、高炉スラグの分量をより多くした高炉セメントの社会実装が注目されています。今後、土木はもとより建築分野・コンクリート製品等でも高炉セメントが広く使用されることにより、わが国のCO₂削減をはじめとする環境負荷低減に大きく寄与できると考えます。

当協会では、こうした地球環境にやさしく性能的に優れた高炉セメントの利用拡大を図るために、2002年に「鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用」の初版を刊行し、その後改訂を重ねて参りました。本冊子へのご質問・ご要望など、お寄せ頂ければ対応させていただくとともに、次回の改訂に役立てたいと考えております。

今後とも、高炉セメントの利用拡大に向けた皆様お一人おひとりのご協力を宜しくお願い致します。

なお、本冊子は当協会ホームページからダウンロードしてお使い頂くことが可能です。また、必要部数をご連絡頂ければ、無償でお送り致します。

最後になりましたが、本冊子の作成にあたり引用・参照させて戴いた文献の著者の方々並びに関係学協会・セメント協会に感謝申し上げます。

鉄鋼スラグ協会のパンフレットや冊子は、以下のURLからダウンロードできます。

<https://www.slg.jp/publication/pamphlet.html>

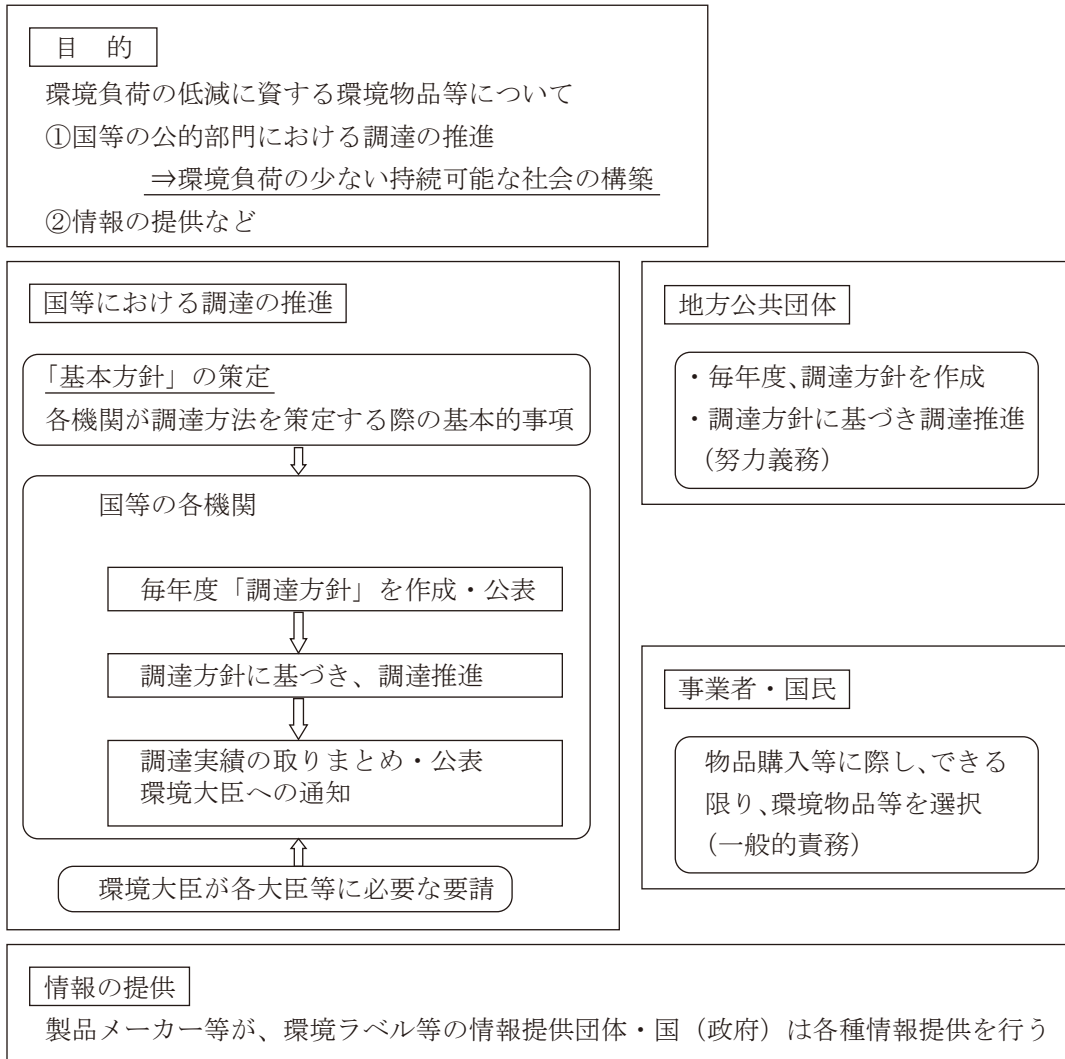
6. 付 録

付録-1 グリーン購入法の概要

1. グリーン購入法とは

「国等の環境物品等の調達に関する法律」として、2000年に制定された。

2. グリーン購入法の仕組み



3. 高炉セメント

高炉セメントは、2001年に特定調達品目指定を受け、判断の基準は「高炉セメントであって、原料に30%を超える分量の高炉スラグを使用していること」とされている。

国土交通省の「2024年度環境物品等の調達方針」では、混合セメントの調達目標は100%である。

国土交通省グリーン購入法調達方針：

https://www.mlit.go.jp/page/kanbo05_hy_003248.html

4. グリーン購入法による高炉セメント・生コンの調達実績

国等の機関における高炉セメントの2022年度調達実績（順不同）

上段:セメント(t) 下段:生コン(m³)

機関名	グリーン購入法 適用品目数量	内、高炉 セメント	類似品目数量 (他セメント)	合計数量	グリーン購入法 適用品目	内、高炉 セメント
国土交通省	384,742	358,091	50,654	435,396	88%	82%
	2,036,606	2,017,521	20,142	2,056,748	99%	98%
農林水産省	15,323	15,319	3	15,326	100%	100%
	442,132	442,132	826	442,957	100%	100%
防衛省	1,320	1,320	0	1,320	100%	100%
	187,618	181,595	0	187,618	100%	97%
財務省	129	129	0	129	100%	100%
	536	536	0	536	100%	100%
環境省	1	1	0	1	100%	100%
	348	348	0	348	100%	100%
厚生労働省	16	16	0	16	100%	100%
	363	363	0	363	100%	100%
宮内庁	0	0	0	0	-	-
	143	143	0	143	100%	100%
警察庁	0	0	0	0	-	-
	5	5	4	9	57%	57%
都市再生機構	113	113	0	113	100%	100%
	13,487	13,487	0	13,487	100%	100%
鉄道建設・運輸施設 整備支援機構	20,503	20,503	0	20,503	100%	100%
	438,699	438,699	0	438,699	100%	100%
水資源機構	10	10	0	10	100%	100%
	3,714	3,714	0	3,714	100%	100%
宇宙航空研究開発機構	0	0	0	0	-	-
	4,471	4,471	0	4,471	100%	100%
日本原子力研究開発 機構	732	732	0	732	100%	100%
	743	743	110	853	87%	87%
量子科学技術 研究開発機構	0	0	0	0	-	-
	29	29	6	35	83%	83%
物質・材料研究機構	0	0	0	0	-	-
	30	0	0	30	100%	0%
高齢・障害・求職者 雇用支援機構	0	0	0	0	-	-
	6	6	0	6	100%	100%

付録-2

住宅の品質確保の促進に関する法律（住宅品質確保法）・住宅性能表示制度における高炉セメントの扱いについて

1. 住宅品質確保法・住宅性能表示制度の概要

住宅の品質確保の促進・住宅購入者等の利益の保護、住宅に係わる紛争の迅速かつ適正な解決を図ることを目的に「住宅の品質確保の促進等に関する法律」が2000年4月に施行された。また、住宅の性能に関する表示の適正化を図るため、住宅性能表示制度が創設され、日本住宅性能表示基準および評価方法基準が設けられた。

評価方法基準では、「劣化の軽減に関すること」において、劣化対策等級（構造躯体等）として、次のように分類している。

等級	住宅の構造躯体等に講じられている対策
3	住宅が限界状態に至るまでの期間が3世代以上（75～90年間）となるため必要な対策
2	住宅が限界状態に至るまでの期間が2世代以上（50～60年間）となるため必要な対策
1	建築基準法に定める対策

鉄筋コンクリート造および鉄骨鉄筋コンクリート造の住宅の場合は、コンクリートの中性を考慮して等級がさだめられる。

2. 評価方法の基準における高炉セメントの扱い

鉄筋コンクリート造および鉄骨鉄筋コンクリート造の住宅において、高炉セメントを用いて等級3および等級2を表示するためには、告示で「コンクリートの水セメント比の算定に当たり、高炉セメントに含まれる高炉スラグの10分の3を除いた部分をその重量として用いるものとする。」と規定されている。（文献44）

告示に従うと、高炉セメントは普通セメントに比べ、水セメント比を7～8%小さくする必要があり、単位セメント量が著しく増加し、コンクリートの品質に悪影響が予想され、また、経済的にも不利となる。そこで、鉄鋼スラグ協会では次に述べる国土交通大臣の特別評価方法認定を取得した。

3. 鉄鋼スラグ協会が取得した特別評価方法の概要

次の①～③の条件を満たす場合、水セメント比の算定に当たっては、高炉スラグの質量を除かないこととする。

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

表 1. 品確法告示で定められた水セメント比

劣化対策等級	(イ)	(ロ)
等級 3	50%以下	55%以下
等級 2	55%以下	60%以下
等級 1	建築基準法を満足する値	

表 2. 最小かぶり厚さ

	部 位	最少かぶり厚さ (cm)				
		告示内容		特認内容		
		(イ)	(ロ)	(イ)	(ロ)	
直接土に接する部分	壁、柱、床、はり又は基礎の立ち上がり部分	4	5	5	6	
	基礎（立ち上がり部分及び捨てコンクリート部分を除く）	6	7	7	8	
直接土に接しない部分	耐力壁以外の壁又は床	屋 内	2	3	4	5
		屋 外	3	4	—	—
	耐力壁、柱又ははり	屋 内	3	4	5	6
		屋 外	4	5	—	—

(イ)、(ロ) は表 1. の (イ) (ロ) の場合

4. 同認定書の運用方法

本特別評価方法に応じて高炉セメント B 種を使用する場合は、認定書の写しを設計図書に添付し、指定住宅性能評価機関に提出して内容を説明下さい。

この特別評価方法認定は全国で誰でも自由に利用することができる。国土交通大臣が認定した特別評価方法認定書および財団法人日本建築センターの試験結果証明書の本文は当協会のホームページ (URL <https://www.slg.jp>) からダウンロードできる。

※高炉セメント B 種の特別評価方法：<https://www.slg.jp/activity/special.html>

この特別評価方法は 2002 年に認定を取得して以降、多くの集合住宅に適用されてきたが、最近の施工事例として、東京オリンピック・パラリンピック 2020 の選手村宿泊棟が挙げられる。(文献 38)

当施設は宿泊施設として使用された後、共同住宅として利用されるため、住宅性能表示における劣化対策等級 3 を満たす仕様で設計された。文献 38 では、高炉セメントを使用して劣化対策等級 3 を設計するため、上記の特別評価方法を適用したことが述べられ、その設計によるメリットが以下のように紹介されている。

1) 基礎構造物の耐久性向上

当施設は海浜部に立地することから、高炉セメントの塩害対策として有効性に期待した。

2) 二酸化炭素排出量の削減

場所打ち杭に約 20,300m³ の高炉セメントコンクリートを使用し、これにより約 2,000 t の CO₂ を削減した。

3) 合理的・経済的な調合の設定が可能

特別評価方法認定を適用することで高炉セメント使用時も水セメント比の算定をポルトランドセメントと同様に扱うことが可能となる。

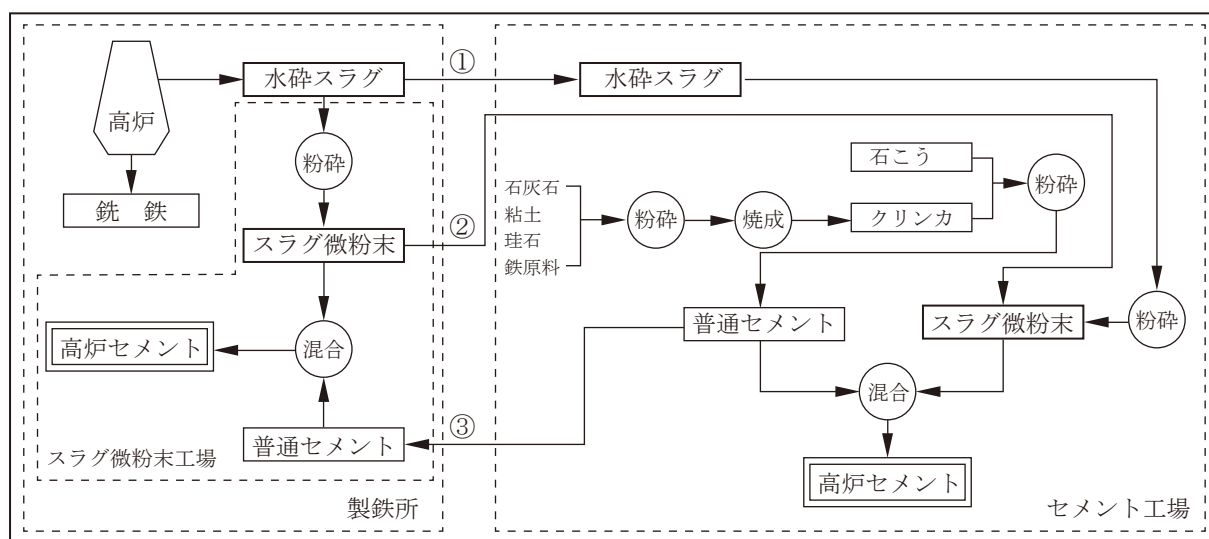


図1. 普通セメントおよび高炉セメント製造の概要

○生産方法 その1 (図1.-①)

1980年頃までは水砕スラグを製鉄所からセメント工場へトラックや船舶で輸送し、水砕スラグを粉砕して高炉スラグ微粉末をつくり、普通セメントと混合して高炉セメントを生産するのが一般的であった。

西日本ではセメント工場は臨海工場が多く、水砕スラグのセメント工場への供給が比較的容易だったため、1980年代から高炉セメントが普及した。一方、東日本のセメント工場は内陸や製鉄所から遠隔地にあるものが多く、当時は水砕スラグの供給が十分とはいえなかったため、東日本における高炉セメントの普及が遅れた一因となった。

○生産方法 その2 (図1.-②)

1980年代後半になり、高炉セメントのニーズが全国的に増加したため、全国のセメント工場にスラグを安定供給する必要が生じた。スラグの円滑な供給を図る目的で、全国の製鉄所にスラグ微粉末工場が建設され、高炉スラグ微粉末をセメント工場へ運搬して高炉セメントを生産する工場が増加した。

○生産方法 その3 (図1.-③)

普通セメントをセメント工場から製鉄所に運び、製鉄所内で高炉スラグ微粉末と混合して高炉セメントを生産する。

高炉セメントの生産方式には前述の3つの方法があり、セメント工場の立地条件に応じて最適な方法が取られている。これらの結果、スラグの円滑な供給が可能となり、従来、高炉セメントの生産が難しいとされた地方が少なくなり、現在では全国の26のセメント工場および6ヶ所の混合所で高炉セメントが生産されている。(p.74 参照)

付録-4

高炉セメントのJIS規格

JIS R 5211 : 2009

○種類

高炉セメントは、高炉スラグの分量によって、表1. の3種類

表1. 高炉セメントの種類及び高炉スラグの分量

種類	高炉スラグの分量 (質量%)
A種	5を超え 30以下
B種	30を超え 60以下
C種	60を超え 70以下

使用するポルトランドセメントに少量混合成分として高炉スラグが含まれているときは、その量を表1. の高炉スラグの分量に含める。

○品質

高炉セメントの品質は、表2. の規定に適合しなければならない。

表2. 高炉セメントの品質規定と測定結果の一例

品質	品質規定			(参考 測定結果の一例)		
	A種	B種	C種	普通ポルトランドセメント	高炉セメント B種	
密度 ^{a)} g/cm ³	—	—	—	3.14	3.03	
比表面積 cm ² /g	3000 以上	3000 以上	3300 以上	3430	3890	
凝結	始発 min	60 以上	60 以上	60 以上	2 ^h 20 ^{min}	3 ^h 05 ^{min}
	終結 h	10 以下	10 以下	10 以下	3 ^h 40 ^{min}	4 ^h 40 ^{min}
安定性 ^{b)}	パット法	良	良	良	良	良
	ルシャテリエ法 mm	10 以下	10 以下	10 以下	—	—
圧縮強さ N/mm ²	3 d	12.5 以上	10.0 以上	7.5 以上	31.6	22.4
	7 d	22.5 以上	17.5 以上	15.0 以上	47.5	36.6
	28 d	42.5 以上	42.5 以上	40.0 以上	62.9	62.6
化学成分 %	酸化マグネシウム	5.0 以下	6.0 以下	6.0 以下	1.32	3.30
	三酸化硫黄	3.5 以下	4.0 以下	4.5 以下	2.07	2.02
	強熱減量	5.0 以下	5.0 以下	5.0 以下	2.10	1.68

注) a)測定値を報告する。

b)安定性は、パット法又はルシャテリエ法いずれかの規定に適合すればよい。

(測定結果の一例は文献45)

○生産量

表3. 高炉セメントの生産高

単位：千t

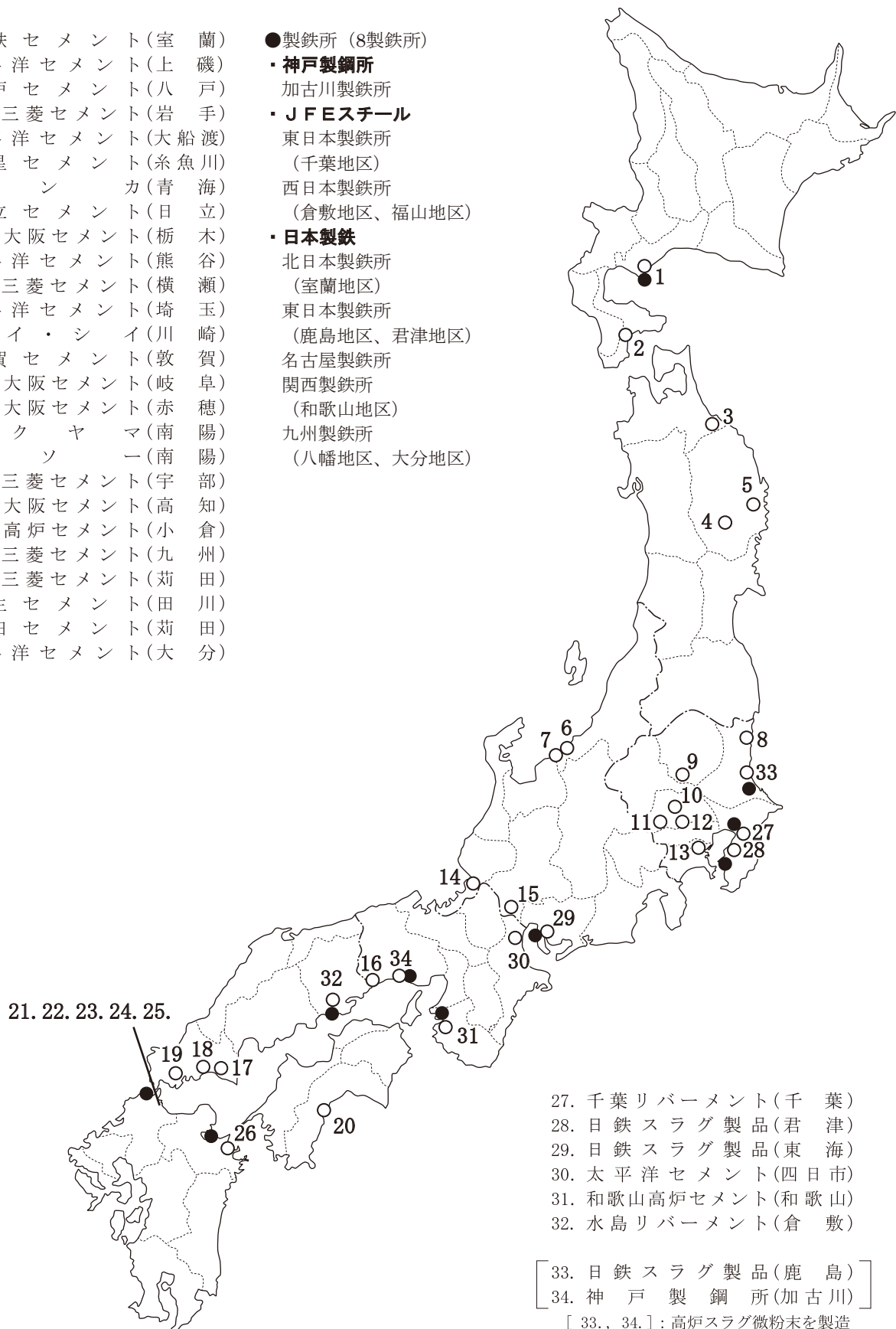
用途	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
高炉セメント	11,645	11,117	10,835	10,380	9,518
全セメント	60,230	58,135	56,053	55,741	51,482
高炉セメント比率	19.3%	19.1%	19.3%	18.6%	18.5%

(全セメント:輸出用クリンカを含む, セメント協会調べ)

1. 日鉄セメント(室蘭)
2. 太平洋セメント(上磯)
3. 八戸セメント(八戸)
4. UBE三菱セメント(岩手)
5. 太平洋セメント(大船渡)
6. 明星セメント(糸魚川)
7. デンカ(青海)
8. 日立セメント(日立)
9. 住友大阪セメント(栃木)
10. 太平洋セメント(熊谷)
11. UBE三菱セメント(横瀬)
12. 太平洋セメント(埼玉)
13. デイ・シイ(川崎)
14. 敦賀セメント(敦賀)
15. 住友大阪セメント(岐阜)
16. 住友大阪セメント(赤穂)
17. トクヤマ(南陽)
18. 東ソー(南陽)
19. UBE三菱セメント(宇部)
20. 住友大阪セメント(高知)
21. 日鉄高炉セメント(小倉)
22. UBE三菱セメント(九州)
23. UBE三菱セメント(苅田)
24. 麻生セメント(田川)
25. 苅田セメント(苅田)
26. 太平洋セメント(大分)

●製鉄所 (8製鉄所)

- ・神戸製鋼所
加古川製鉄所
- ・JFEスチール
東日本製鉄所 (千葉地区)
西日本製鉄所 (倉敷地区、福山地区)
- ・日本製鉄
北日本製鉄所 (室蘭地区)
東日本製鉄所 (鹿島地区、君津地区)
名古屋製鉄所
関西製鉄所 (和歌山地区)
九州製鉄所 (八幡地区、大分地区)

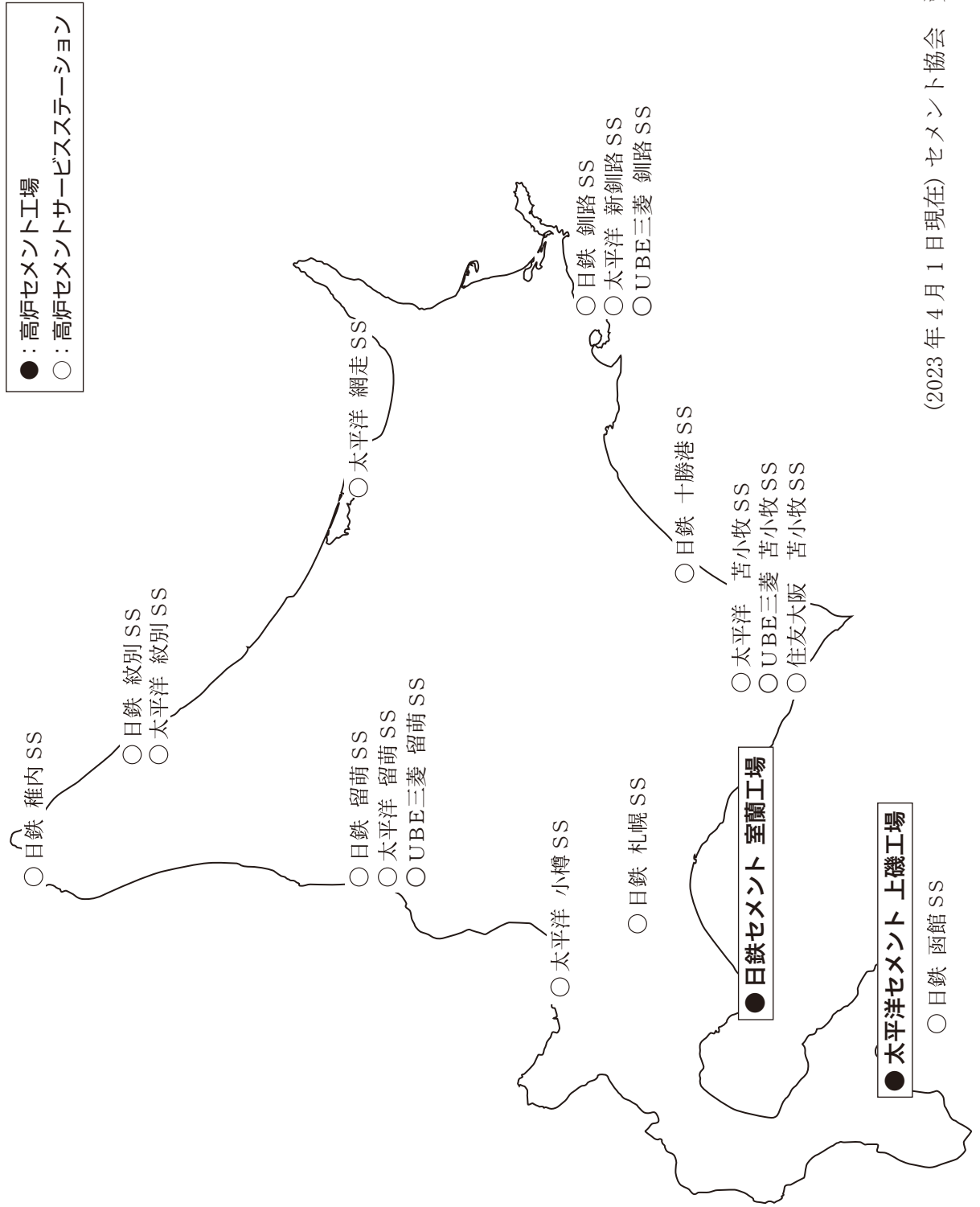


27. 千葉リバーメント(千葉)
28. 日鉄スラグ製品(君津)
29. 日鉄スラグ製品(東海)
30. 太平洋セメント(四日市)
31. 和歌山高炉セメント(和歌山)
32. 水島リバーメント(倉敷)

- [33. 日鉄スラグ製品(鹿島)
34. 神戸製鋼所(加古川)
[33., 34.] : 高炉スラグ微粉末を製造

(2024年4月現在)

高炉セメント工場及び高炉セメント供給基地（北海道）



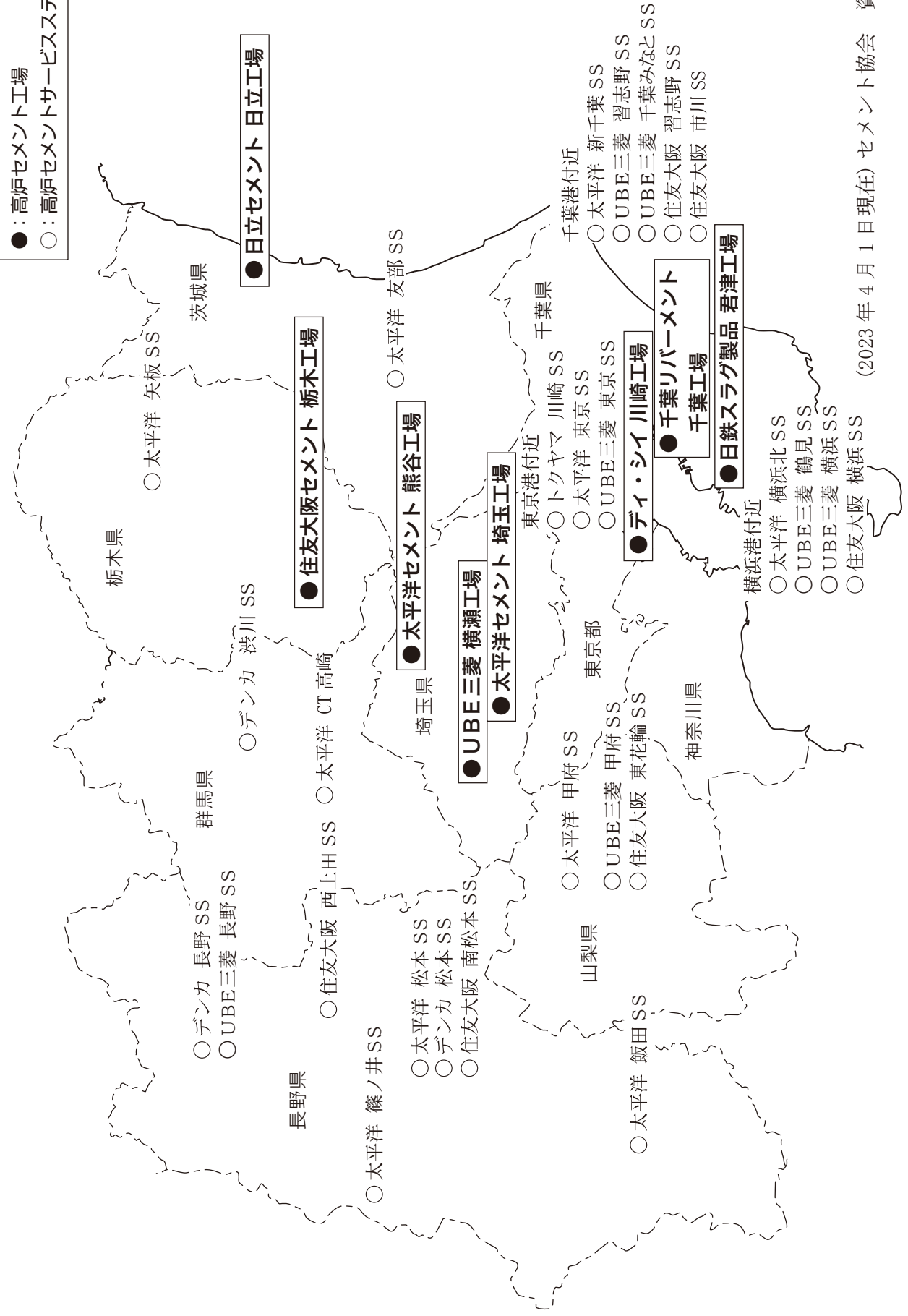
高炉セメント工場及び高炉セメント供給基地（東北地方）



(2023年4月1日現在) セメント協会 資料

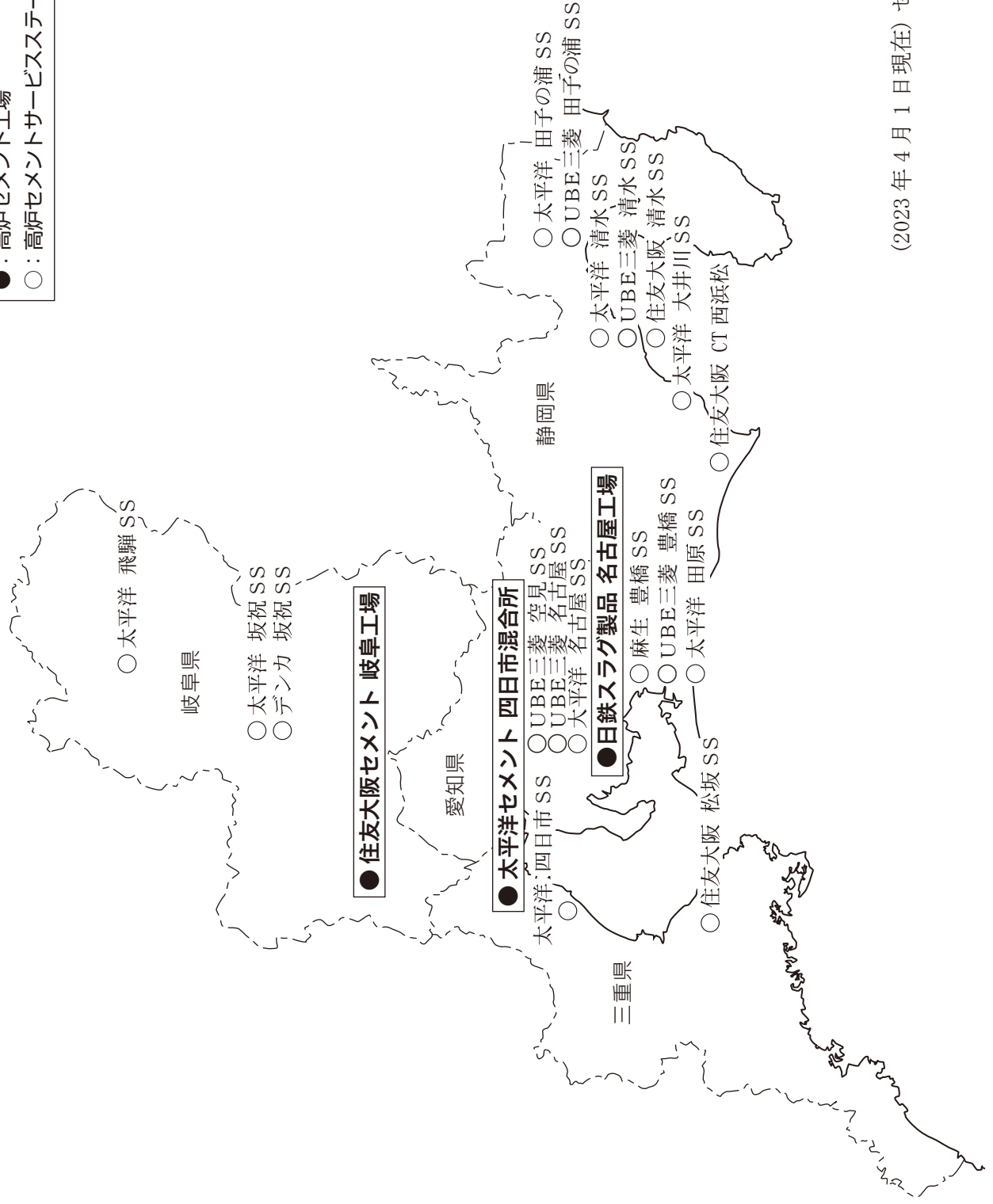
高炉セメント工場及び高炉セメント供給基地（関東地方）

●：高炉セメント工場
○：高炉セメントサードステーション



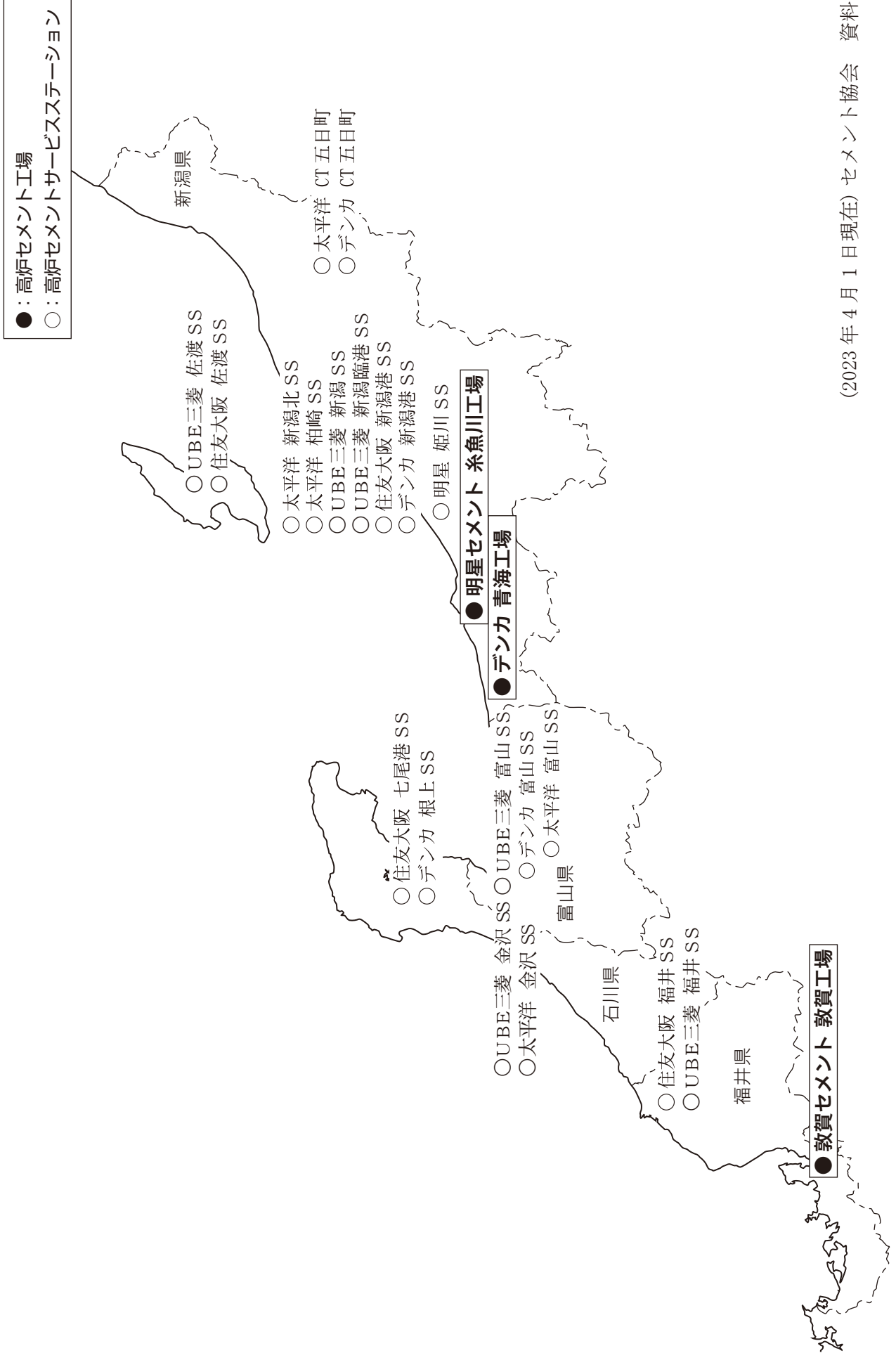
高炉セメント工場及び高炉セメント供給基地（東海地方）

- ：高炉セメント工場
- ：高炉セメントサービスステーション



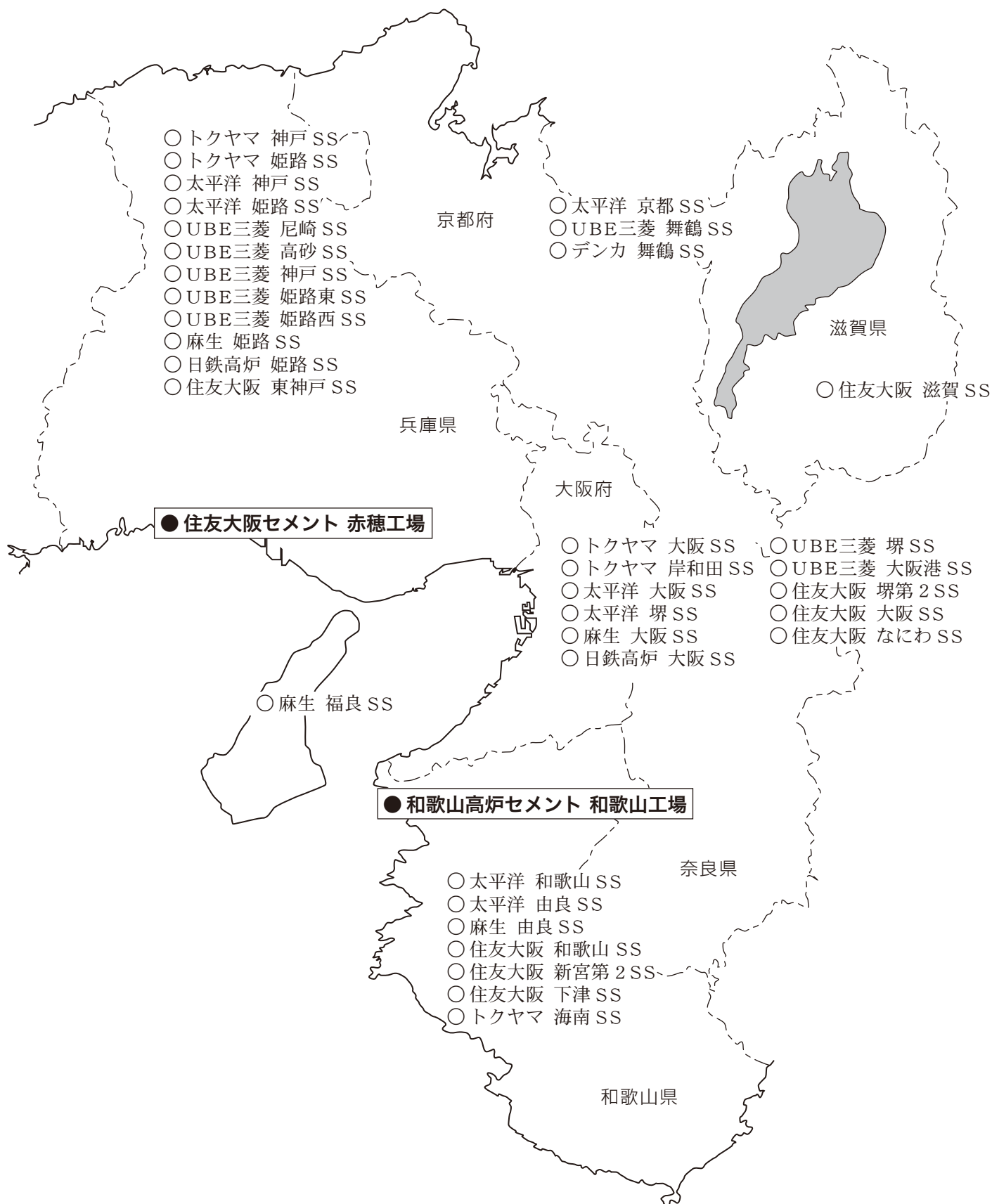
(2023年4月1日現在) セメント協会 資料

高炉セメント工場及び高炉セメント供給基地（北陸地方）



高炉セメント工場及び高炉セメント供給基地（近畿地方）

●：高炉セメント工場
○：高炉セメントサービスステーション

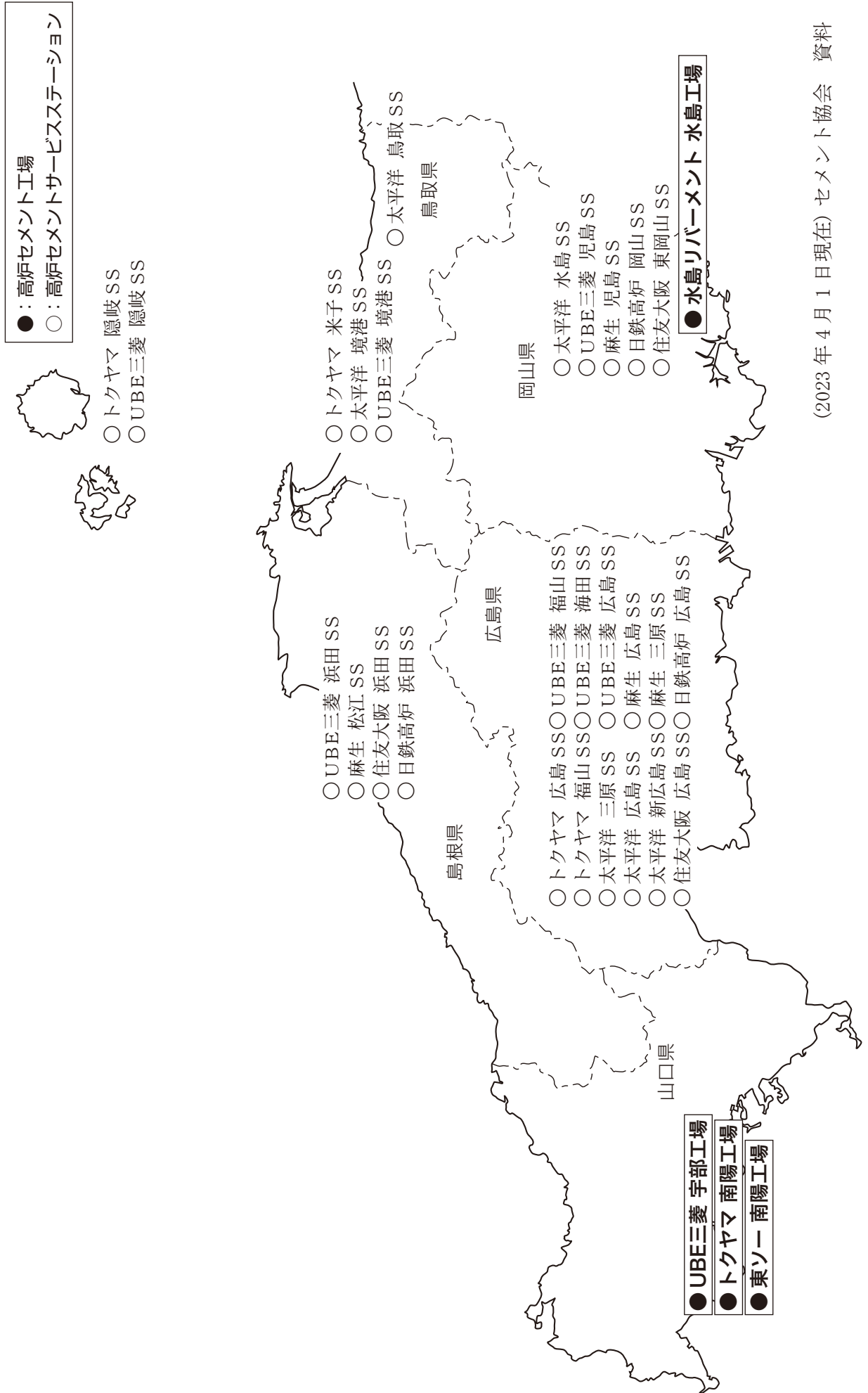


(2023年4月1日現在) セメント協会 資料

高炉セメント工場及び高炉セメント供給基地（四国地方）

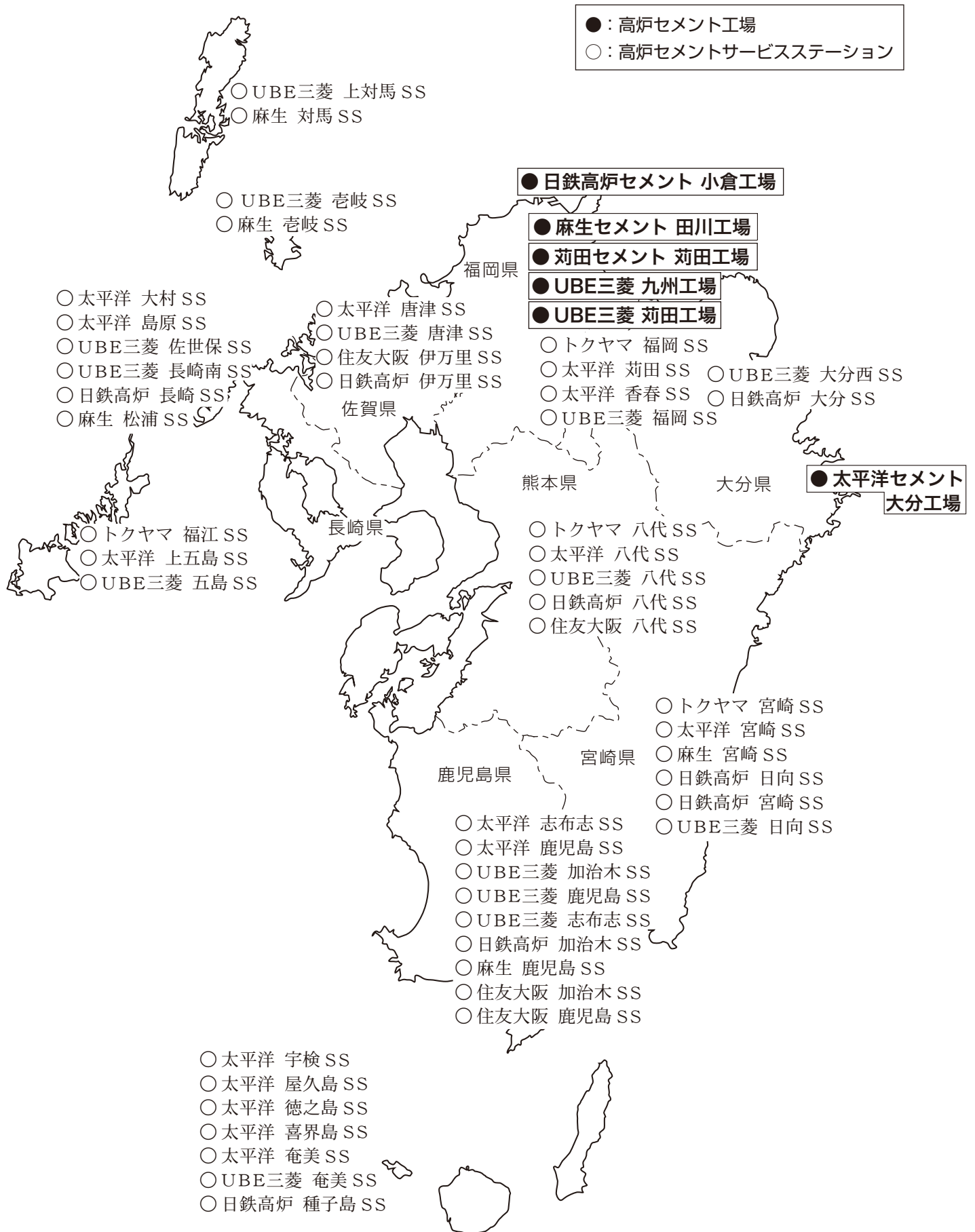


高炉セメント工場及び高炉セメント供給基地（中国地方）



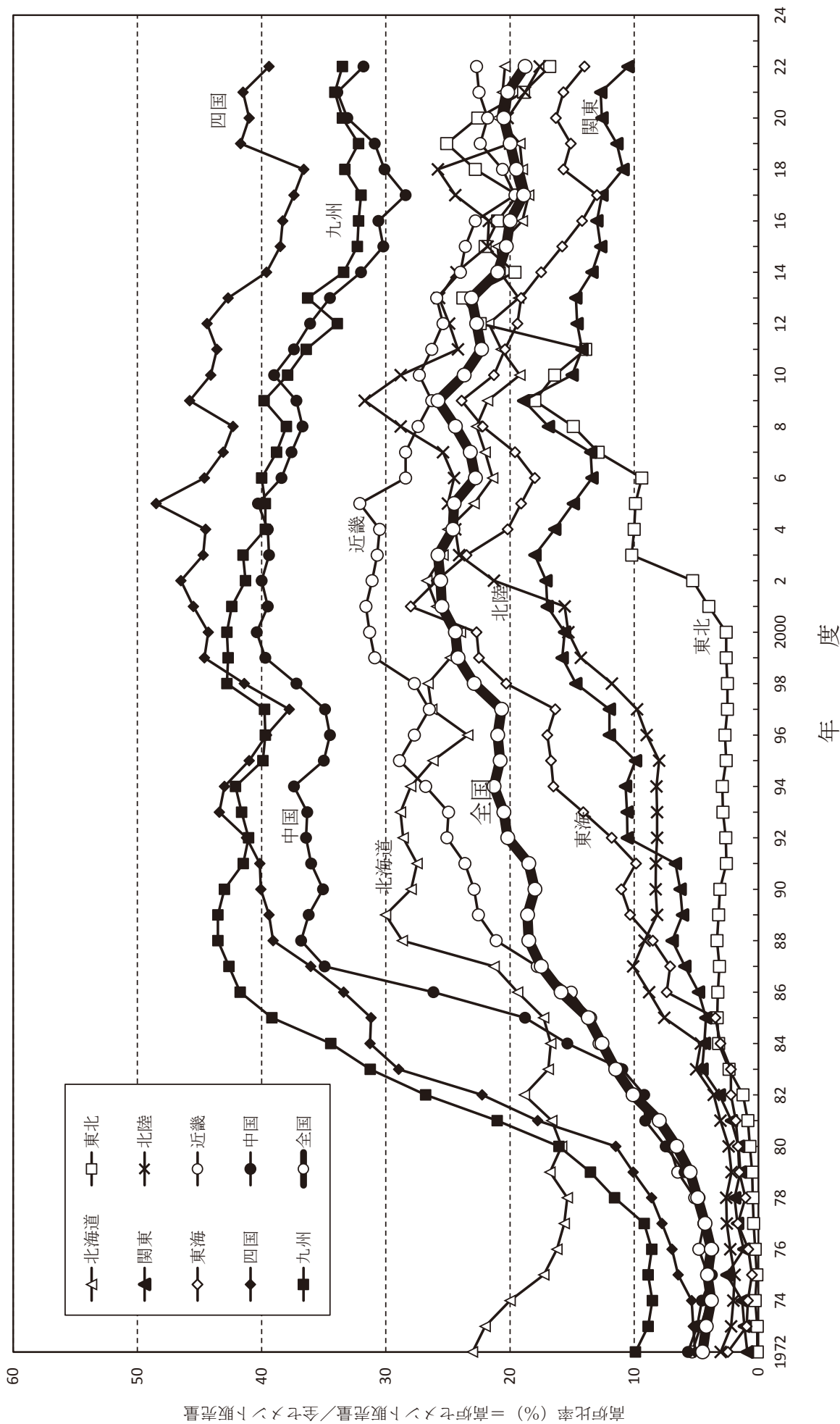
(2023年4月1日現在) セメント協会 資料

高炉セメント工場及び高炉セメント供給基地（九州地方）



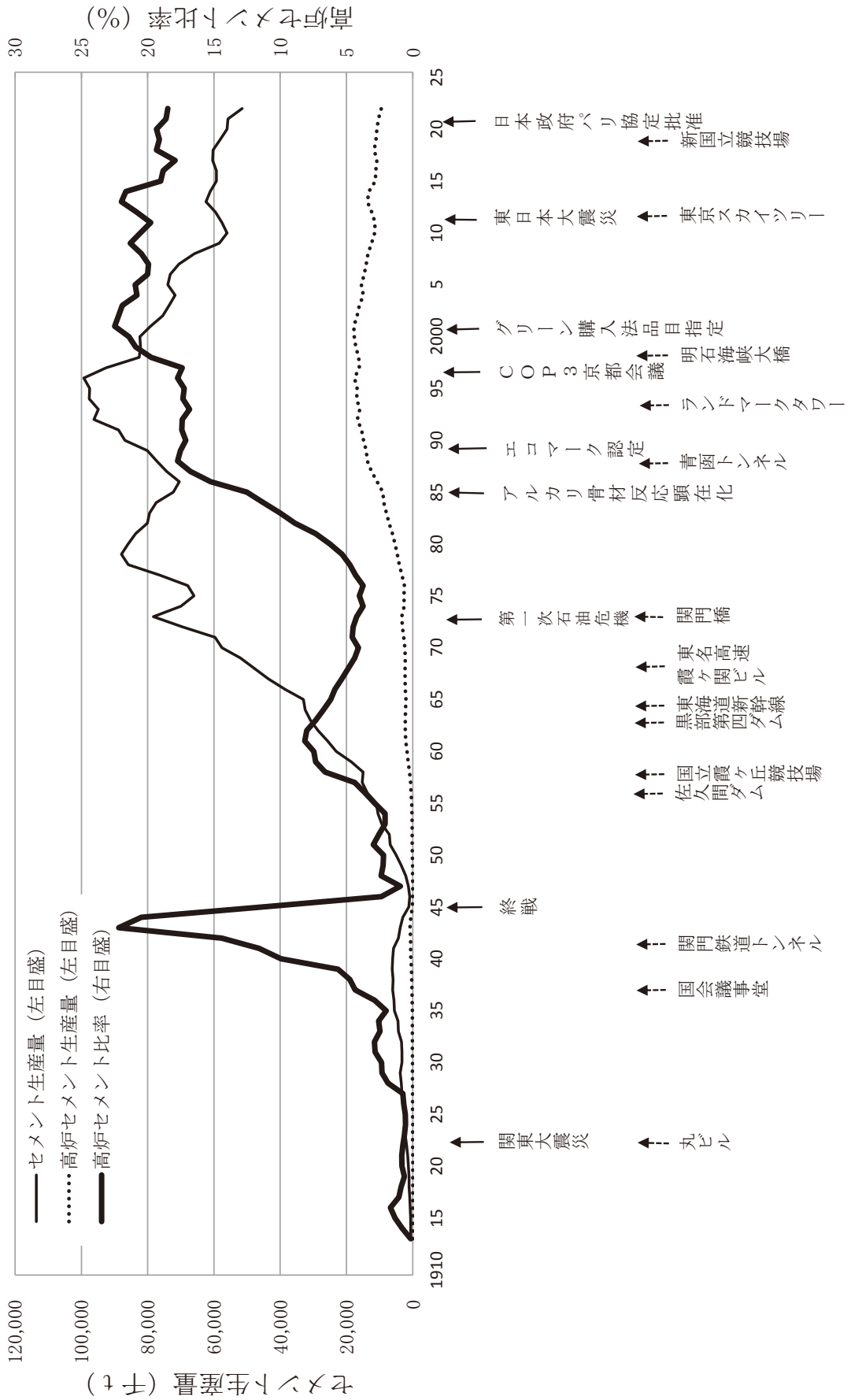
(2023年4月1日現在) セメント協会 資料

全国の高炉セメント需要比率の推移
 (土木・建築・官需・民需の合計)



全国のセメント生産量と高炉セメント比率の推移

付録-8



付録-9

セメント販売高の推移

単位：千t

年 度		1993FY	1998FY	2003FY	2008FY	2013FY	2015FY	2017FY	2019FY	2021FY	2022FY	2023CY
北 海 道	高炉セメント	1,215	985	784	522	416	377	373	362	369	352	342
	全セメント	4,179	3,705	3,093	2,299	2,153	1,793	2,013	1,885	1,790	1,728	1,649
	高炉比率	29.1%	26.6%	25.3%	22.7%	19.3%	21.0%	18.5%	19.2%	20.6%	20.4%	20.7%
東 北	高炉セメント	204	156	469	501	1,122	1,054	809	943	580	488	440
	全セメント	6,570	6,128	4,610	3,353	4,709	4,784	4,162	3,753	3,075	2,904	2,595
	高炉比率	3.1%	2.5%	10.2%	14.9%	23.8%	22.0%	19.4%	25.1%	18.9%	16.8%	17.0%
関 東 1 区	高炉セメント	1,604	2,014	2,081	1,966	1,526	1,187	1,202	982	1,012	802	797
	全セメント	15,552	13,821	12,339	11,241	10,724	9,551	9,702	9,409	9,023	8,846	8,729
	高炉比率	10.3%	14.6%	16.9%	17.5%	14.2%	12.4%	12.4%	10.4%	11.2%	9.1%	9.1%
関 東 2 区	高炉セメント	793	925	1,057	675	654	490	504	489	582	133	468
	全セメント	7,205	6,190	5,122	4,403	4,063	3,684	3,877	3,464	3,500	631	3,281
	高炉比率	11.0%	14.9%	20.6%	15.3%	16.1%	13.3%	13.0%	14.1%	16.6%	21.0%	14.3%
関 東 計	高炉セメント	2,397	2,939	3,138	2,641	2,180	1,677	1,706	1,471	1,594	1,316	1,265
	全セメント	22,757	20,011	17,460	15,644	14,787	13,235	13,579	12,872	12,523	12,472	12,011
	高炉比率	10.5%	14.7%	18.0%	16.9%	14.7%	12.7%	12.6%	11.4%	12.7%	10.5%	10.5%
北 陸	高炉セメント	335	464	711	742	569	421	450	444	317	265	254
	全セメント	4,179	3,939	2,945	2,578	2,210	1,932	1,842	2,217	1,684	1,506	1,428
	高炉比率	8.0%	11.8%	24.1%	28.8%	25.7%	21.8%	24.4%	20.0%	18.8%	17.6%	17.8%
東 海	高炉セメント	1,137	1,588	1,834	1,415	991	769	598	703	698	614	589
	全セメント	8,003	7,820	7,802	6,379	5,196	4,872	4,586	4,642	4,446	4,383	4,261
	高炉比率	14.2%	20.3%	23.5%	22.2%	19.1%	15.8%	13.0%	15.1%	15.7%	14.0%	13.8%
近 畿	高炉セメント	2,917	2,796	2,482	1,922	1,677	1,399	1,063	1,249	1,207	1,227	1,131
	全セメント	11,730	10,103	8,091	7,026	6,480	5,923	5,421	5,574	5,354	5,409	5,190
	高炉比率	24.9%	27.7%	30.7%	27.4%	25.9%	23.6%	19.6%	22.4%	22.5%	22.7%	21.8%
四 国	高炉セメント	1,614	1,477	1,165	772	778	603	575	656	557	496	441
	全セメント	3,743	3,571	2,606	1,824	1,823	1,565	1,535	1,571	1,341	1,258	1,143
	高炉比率	43.1%	41.4%	44.7%	42.3%	42.7%	38.5%	37.4%	41.7%	41.5%	39.4%	38.6%
中 国	高炉セメント	2,010	1,797	1,660	1,228	1,023	775	715	786	784	699	672
	全セメント	5,555	4,828	4,214	3,343	2,968	2,565	2,514	2,548	2,313	2,199	2,104
	高炉比率	36.2%	37.2%	39.4%	36.7%	34.5%	30.2%	28.4%	30.9%	33.9%	31.8%	31.9%
九 州	高炉セメント	4,143	3,827	2,928	2,240	2,103	1,521	1,601	1,571	1,563	1,554	1,352
	全セメント	9,864	8,934	7,060	5,892	5,788	4,711	4,996	4,874	4,577	4,646	4,228
	高炉比率	42.0%	42.8%	41.5%	38.0%	36.3%	32.3%	32.0%	32.2%	34.1%	33.5%	32.0%
沖 縄	高炉セメント	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	全セメント	1,159	1,035	975	825	839	968	1,049	1,010	768	759	765
	高炉比率	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0.0%
全 国	高炉セメント	15,971	16,028	15,172	11,984	10,858	8,595	7,889	8,185	7,668	7,011	6,487
	全セメント	77,740	70,075	58,856	49,164	46,953	42,347	41,701	40,948	37,872	37,265	35,374
	高炉比率	20.6%	22.9%	25.8%	24.4%	23.1%	20.3%	18.9%	20.0%	20.2%	18.8%	18.3%

※関東1区:埼玉・千葉・東京・神奈川

関東2区:茨城・栃木・群馬・山梨・長野

(セメント協会調べ)

付録-10 2022年度 全セメント・高炉セメント都道府県別販売高

単位：千t

	2022年度実績		2021年度実績		前年比		高炉セメント比率		
	全セメント	高炉セメント	全セメント	高炉セメント	全セメント	高炉セメント	2022年度	2021年度	2022-21年度
北海道	1,728	352	1,790	369	96.6%	95.4%	20.4%	20.6%	-0.3%
青森	331	51	395	69	83.7%	73.0%	15.3%	17.6%	-2.3%
岩手	395	36	409	66	96.6%	54.8%	9.1%	16.0%	-6.9%
宮城	711	108	764	91	93.1%	118.7%	15.2%	11.9%	3.3%
秋田	476	80	397	68	119.7%	117.0%	16.8%	17.2%	-0.4%
山形	311	66	358	103	87.0%	63.9%	21.1%	28.8%	-7.7%
福島	679	148	751	183	90.4%	81.2%	21.8%	24.3%	-2.5%
東北計	2,904	488	3,075	580	94.4%	84.2%	16.8%	18.9%	-2.0%
埼玉	2,412	152	2,271	147	106.2%	103.4%	6.3%	6.5%	-0.2%
千葉	1,614	239	1,743	297	92.6%	80.5%	14.8%	17.0%	-2.2%
東京	2,656	248	2,665	268	99.6%	92.6%	9.4%	10.1%	-0.7%
神奈川	2,163	163	2,343	300	92.3%	54.2%	7.5%	12.8%	-5.3%
1区計	8,846	802	9,023	1,012	98.0%	79.2%	9.1%	11.2%	-2.2%
茨城	1,398	180	1,319	157	105.9%	114.3%	12.8%	11.9%	0.9%
栃木	737	70	735	88	100.4%	80.3%	9.6%	11.9%	-2.4%
群馬	528	65	523	82	100.9%	79.5%	12.4%	15.7%	-3.3%
山梨	333	66	331	94	100.7%	70.3%	19.8%	28.3%	-8.6%
長野	631	133	592	161	106.5%	82.4%	21.0%	27.2%	-6.1%
2区計	3,627	514	3,500	582	103.6%	88.3%	14.2%	16.6%	-2.4%
関東計	12,472	1,316	12,523	1,594	99.6%	82.6%	10.5%	12.7%	-2.2%
富山	307	61	318	61	96.7%	98.7%	19.7%	19.3%	0.4%
石川	274	40	315	57	87.0%	69.8%	14.5%	18.1%	-3.6%
福井	370	52	433	66	85.3%	79.2%	14.1%	15.2%	-1.1%
新潟	556	113	619	133	89.9%	84.8%	20.3%	21.5%	-1.2%
北陸計	1,506	265	1,684	317	89.4%	83.6%	17.6%	18.8%	-1.2%
岐阜	768	140	839	194	91.5%	72.4%	18.3%	23.1%	-4.8%
静岡	851	154	897	189	94.9%	81.3%	18.1%	21.1%	-3.0%
愛知	2,127	217	2,022	200	105.2%	108.6%	10.2%	9.9%	0.3%
三重	637	103	688	115	92.6%	89.2%	16.1%	16.7%	-0.6%
東海計	4,383	614	4,446	698	98.6%	88.0%	14.0%	15.7%	-1.7%
滋賀	639	88	590	78	108.4%	112.1%	13.7%	13.3%	0.4%
京都	603	111	630	129	95.7%	86.3%	18.5%	20.5%	-2.0%
大阪	2,269	487	2,181	405	104.1%	120.3%	21.5%	18.6%	2.9%
兵庫	1,353	344	1,406	382	96.2%	89.9%	25.4%	27.2%	-1.8%
奈良	196	54	198	68	98.7%	79.5%	27.8%	34.5%	-6.7%
和歌山	349	142	349	144	100.0%	98.5%	40.8%	41.4%	-0.6%
近畿計	5,409	1,227	5,354	1,207	101.0%	101.6%	22.7%	22.5%	0.1%
徳島	242	107	259	107	93.8%	99.8%	44.2%	41.5%	2.7%
香川	323	88	291	82	111.1%	107.5%	27.4%	28.3%	-0.9%
愛媛	416	163	469	188	88.8%	86.8%	39.2%	40.1%	-0.9%
高知	276	137	323	179	85.3%	76.6%	49.7%	55.4%	-5.6%
四国計	1,258	496	1,341	557	93.8%	89.1%	39.4%	41.5%	-2.1%
鳥取	153	62	157	68	97.6%	91.5%	40.5%	43.2%	-2.7%
島根	223	83	242	102	92.1%	82.0%	37.3%	41.9%	-4.6%
岡山	607	202	618	193	98.2%	104.5%	33.2%	31.2%	2.0%
広島	762	242	799	284	95.4%	85.2%	31.8%	35.6%	-3.8%
山口	455	110	498	138	91.2%	80.0%	24.2%	27.6%	-3.4%
中国計	2,199	699	2,313	784	95.1%	89.2%	31.8%	33.9%	-2.1%
福岡	1,711	420	1,658	406	103.2%	103.5%	24.5%	24.5%	0.1%
佐賀	356	139	317	120	112.1%	116.4%	39.1%	37.7%	1.4%
長崎	446	207	464	216	96.1%	95.5%	46.3%	46.6%	-0.3%
熊本	845	299	754	281	112.0%	106.3%	35.4%	37.3%	-1.9%
大分	407	152	448	173	90.9%	88.0%	37.4%	38.6%	-1.2%
宮崎	328	113	350	121	93.7%	93.2%	34.4%	34.6%	-0.2%
鹿児島	553	225	586	246	94.4%	91.5%	40.7%	42.0%	-1.3%
九州計	4,646	1,554	4,577	1,563	101.5%	99.5%	33.5%	34.1%	-0.7%
沖縄	759	0	768	0	98.9%	—	0.0%	0.0%	0.0%
全国計	37,265	7,011	37,872	7,668	98.4%	91.4%	18.8%	20.2%	-1.4%
内東日本	22,994	3,036	23,518	3,558	97.8%	85.3%	13.2%	15.1%	-1.9%
内西日本	14,271	3,976	14,353	4,111	99.4%	96.7%	27.9%	28.6%	-0.8%

付録-11 2017~22年度 全セメント・ポルトランドセメント・
混合セメント・高炉セメントの地区別販売高

	2017年度				2018年度				2019年度			
	全セメント	全ポルトランドセメント	全混合セメント	内、高炉セメント	全セメント	全ポルトランドセメント	全混合セメント	内、高炉セメント	全セメント	全ポルトランドセメント	全混合セメント	内、高炉セメント
北海道	2,014	1,570	443	373	1,917	1,502	416	365	1,885	1,500	385	362
青森	431	350	81	59	418	340	78	54	363	305	58	50
岩手	932	723	209	192	973	683	290	265	738	497	241	234
宮城	1,113	903	210	207	1,025	820	205	198	983	769	214	208
秋田	285	232	54	54	311	244	67	67	311	238	73	73
山形	442	355	87	83	402	292	110	105	384	278	106	106
福島	959	737	223	213	1,000	741	260	254	973	696	277	273
東北計	4,163	3,300	863	809	4,129	3,119	1,009	942	3,753	2,783	970	943
埼玉	2,365	2,220	134	132	2,439	2,282	147	144	2,356	2,211	134	132
千葉	1,640	1,364	266	266	1,703	1,480	216	214	1,732	1,462	255	255
東京	3,323	2,782	528	527	3,292	2,961	323	321	2,843	2,502	331	327
神奈川	2,374	2,084	277	277	2,657	2,311	334	334	2,478	2,194	267	267
1区計	9,702	8,450	1,205	1,202	10,091	9,034	1,019	1,014	9,409	8,370	988	982
茨城	1,478	1,265	153	149	1,349	1,147	149	145	1,304	1,105	146	141
栃木	799	714	82	79	779	698	79	78	712	634	75	75
群馬	684	490	175	65	634	473	142	79	578	468	92	92
山梨	356	254	101	95	363	271	92	81	335	243	92	92
長野	560	445	115	115	533	427	106	106	534	431	103	103
2区計	3,877	3,169	626	504	3,659	3,016	568	489	3,464	2,881	508	489
関東計	13,579	11,619	1,831	1,706	13,750	12,050	1,588	1,503	12,872	11,251	1,497	1,471
富山	309	247	62	62	346	276	70	69	323	261	62	62
石川	429	265	164	161	479	337	142	139	426	358	68	65
福井	462	340	122	101	723	488	235	224	782	583	200	160
新潟	643	516	126	125	712	560	152	152	686	528	157	157
北陸計	1,843	1,367	475	450	2,261	1,662	599	583	2,217	1,730	487	444
岐阜	785	656	129	129	799	678	121	121	782	630	152	152
静岡	1,048	892	155	155	1,067	888	172	172	974	806	167	167
愛知	1,994	1,785	209	209	2,296	1,912	384	356	2,270	1,971	299	281
三重	759	654	105	105	733	612	121	121	616	513	103	103
東海計	4,586	3,987	598	598	4,896	4,091	798	771	4,642	3,920	721	703
滋賀	564	513	50	50	590	528	61	61	589	530	59	59
京都	590	489	101	101	647	533	113	113	655	509	146	146
大阪	2,317	1,868	449	448	2,225	1,808	417	417	2,258	1,807	451	451
兵庫	1,435	1,159	276	276	1,479	1,143	336	336	1,442	1,085	357	357
奈良	190	132	59	59	209	141	68	68	196	128	68	68
和歌山	326	196	130	130	358	217	141	141	434	265	169	169
近畿計	5,422	4,357	1,065	1,063	5,507	4,371	1,136	1,136	5,574	4,324	1,250	1,249
徳島	299	184	115	115	326	197	129	129	364	184	180	180
香川	384	270	115	102	371	250	121	94	361	228	133	97
愛媛	520	324	196	196	478	294	185	185	515	313	202	202
高知	332	154	178	162	330	166	165	144	331	155	176	176
四国計	1,535	932	603	575	1,506	906	600	552	1,571	879	692	656
鳥取	217	126	91	91	184	105	79	79	189	99	91	91
島根	224	128	96	96	285	162	123	123	303	199	105	105
岡山	595	445	150	150	634	460	174	174	647	460	187	184
広島	852	623	229	229	791	575	216	216	846	591	255	255
山口	626	452	175	148	549	387	162	143	562	410	152	152
中国計	2,514	1,773	741	715	2,443	1,689	754	734	2,548	1,758	790	786
福岡	1,760	1,343	417	403	1,802	1,322	480	443	1,795	1,337	457	438
佐賀	277	182	95	95	282	186	97	97	280	177	103	103
長崎	584	342	242	242	560	316	244	244	502	303	199	199
熊本	841	531	310	310	901	571	330	330	847	533	314	314
大分	443	293	150	150	473	307	166	164	444	287	156	143
宮崎	401	264	137	137	385	250	135	135	353	229	124	124
鹿児島	689	413	276	263	689	404	285	285	654	404	250	250
九州計	4,996	3,367	1,629	1,601	5,094	3,357	1,737	1,697	4,874	3,271	1,603	1,571
沖縄	1,049	1,047	2	0	996	995	0	0	1,010	1,010	0	0
全国計	41,701	33,319	8,251	7,889	42,499	33,743	8,637	8,283	40,948	32,426	8,395	8,185
内東日本	26,184	21,843	4,210	3,935	26,952	22,424	4,409	4,164	25,370	21,184	4,060	3,923
内西日本	15,517	11,476	4,041	3,954	15,546	11,319	4,227	4,119	15,578	11,242	4,335	4,262

注 全ポルトランドセメント：普通、超・早強、庸熱、低熱、耐硫酸塩、その他の合計、
全混合セメント：高炉、シリカ、フライアッシュ、その他の合計

単位：千t

2020年度				2021年度				2022年度			
全セメント	全ポルトランドセメント	全混合セメント	内、高炉セメント	全セメント	全ポルトランドセメント	全混合セメント	内、高炉セメント	全セメント	全ポルトランドセメント	全混合セメント	内、高炉セメント
1,912	1,487	425	401	1,790	1,412	378	369	1,728	1,372	356	352
360	316	44	41	395	313	82	69	331	271	60	51
529	390	139	139	409	344	66	66	395	359	36	36
859	706	153	143	764	671	93	91	711	602	109	108
356	269	87	87	397	329	68	68	476	396	80	80
358	265	92	92	358	255	103	103	311	246	66	66
926	656	271	264	751	562	189	183	679	529	150	148
3,388	2,601	787	767	3,075	2,474	601	580	2,903	2,403	500	488
2,286	2,131	143	141	2,271	2,112	149	147	2,412	2,248	154	152
1,651	1,408	227	227	1,743	1,433	297	297	1,614	1,359	239	239
2,580	2,307	264	256	2,665	2,374	279	268	2,656	2,392	253	248
2,387	2,084	294	294	2,343	2,027	301	300	2,163	1,992	163	163
8,904	7,931	928	918	9,023	7,947	1,026	1,012	8,845	7,991	809	802
1,287	1,047	188	184	1,319	1,101	161	157	1,398	1,163	185	180
765	656	106	106	735	639	94	88	737	637	97	70
544	432	95	95	523	423	82	82	528	445	65	65
314	206	107	95	331	225	106	94	333	251	82	66
619	446	173	173	592	431	161	161	631	497	133	133
3,529	2,787	669	653	3,500	2,818	604	582	3,627	2,993	562	513
12,433	10,717	1,597	1,570	12,523	10,765	1,630	1,594	12,472	10,984	1,371	1,316
310	245	65	64	318	256	62	61	307	245	62	61
326	272	54	54	315	256	58	57	274	232	42	40
615	514	101	87	433	364	69	66	370	314	55	52
628	455	174	174	619	486	133	133	556	443	113	113
1,880	1,486	394	379	1,684	1,362	323	317	1,506	1,234	272	265
800	631	169	165	839	636	204	194	768	609	159	140
948	709	239	239	897	708	189	189	851	697	154	154
2,040	1,826	214	211	2,022	1,819	203	200	2,127	1,909	217	217
636	528	108	108	688	573	115	115	637	535	103	103
4,424	3,694	730	723	4,446	3,735	711	698	4,383	3,750	633	614
592	509	83	83	590	511	78	78	639	552	88	88
585	470	115	115	630	501	129	129	603	492	111	111
2,228	1,821	407	405	2,181	1,774	407	405	2,269	1,781	488	487
1,413	1,051	362	361	1,406	1,022	385	382	1,353	1,009	344	344
192	131	61	61	198	130	68	68	196	141	54	54
402	248	154	154	349	204	144	144	349	207	142	142
5,412	4,230	1,181	1,179	5,354	4,142	1,212	1,207	5,409	4,182	1,227	1,227
326	176	150	150	259	151	107	107	242	135	107	107
301	213	88	82	291	208	82	82	323	235	88	88
477	292	185	185	469	280	188	188	416	253	163	163
341	166	176	176	323	144	179	179	276	136	140	137
1,445	846	598	593	1,341	784	557	557	1,258	759	499	496
163	91	72	72	157	89	68	68	153	91	62	62
266	179	88	88	242	141	102	102	223	140	83	83
600	413	187	187	618	423	194	193	607	405	202	202
863	564	299	299	799	514	284	284	762	519	242	242
510	359	151	151	498	361	138	138	455	344	110	110
2,403	1,606	797	796	2,313	1,528	786	784	2,199	1,499	700	699
1,581	1,188	393	393	1,658	1,252	406	406	1,711	1,291	420	420
306	199	107	107	317	197	120	120	356	216	139	139
463	270	193	193	464	247	216	216	446	239	207	207
738	461	277	268	754	431	323	281	855	496	349	299
439	271	169	146	448	268	180	173	407	255	152	152
350	219	131	131	350	229	121	121	328	215	113	113
591	332	260	260	586	340	246	246	553	328	225	225
4,468	2,939	1,529	1,497	4,577	2,965	1,612	1,563	4,646	3,041	1,605	1,554
886	886	0	0	768	767	0	0	759	759	0	0
38,650	30,492	8,039	7,905	37,872	29,935	7,808	7,669	37,263	29,983	7,163	7,010
24,037	19,985	3,934	3,840	23,518	19,749	3,641	3,558	22,992	19,743	3,132	3,034
14,613	10,508	4,105	4,065	14,353	10,187	4,167	4,111	14,271	10,240	4,031	3,976

(セメント協会調べ)

7. 参 考 文 献

1. 日本コンクリート工学会「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016」pp151～163, 2016年11月.
2. セメント協会コンクリート専門委員会報告, F-53, 「蒸気養生条件がコンクリートの強度発現に及ぼす影響」2006年.
3. セメント協会編「セメント系固化材による地盤改良マニュアル」, 2003年.
4. 堺孝司「北海道の土木工事における寒中コンクリートの施工実態」, コンクリート工学, Vol.29, No.6, June, 1991.
5. 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」, コンクリート工学誌, Vol.54, No.9, 2016年9月.
6. 濱田秀則, Tarek Uddin Mohammed, 山路 徹「30年間常時海水中に暴露されたコンクリートの諸性質について」, 材料, Vol.54, No.8, 2005年8月.
7. セメント協会コンクリート専門委員会報告, F-56, 「各種低発熱セメントを用いたコンクリートの海洋環境下での鉄筋の腐食に関する研究材齢10年最終報告」2010年3月, p142の資料表-1.3.2の数値より作成.
8. 大即信明「高炉セメントを使用した港湾 RC 構造物の塩害耐久性に関する研究」, 2010年度(財)港湾空港建設技術サービスセンター研究開発助成報告書, 2011年4月.
9. 土木研究所成果報告書「非塩化物型凍結防止剤の開発等に関する共同研究報告書, p24, 2003年」より転載.
10. 日本コンクリート工学協会「複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告書」2001年5月.
11. 国土交通省東北地方整備局「東北地方におけるコンクリート構造物設計・施工ガイドライン(案)」2009年.
12. SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術「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」, 「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)」, 2016年10月.
13. 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会報告書, 2014年.
14. 橋本勝文, 横田 弘, 佐藤靖彦, 杉山隆文「凍結融解作用および塩化物イオンの浸透に伴うセメント硬化体特性の変化」, セメント・コンクリート, No.803, 2014年1月.
15. 丸安隆和, 小林一輔, 阪本好史「高炉セメントコンクリートの研究」, 東京大学生産技術研究所報告, 第15巻, 第4号, 1965年2月.
16. 岡田研介, 古川柳太郎, 宮入英彦「温泉水に対するスラグ系セメントの耐久性について」, セメント技術年報, 31, 1977年.

17. 土木研究センター「建設省総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発（土木構造物に関する研究成果）報告書，pp293-294，1989
18. 古賀裕久，河野広隆「骨材のアルカリ骨材反応性に関する全国調査結果」土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，第5部，2004年9月.
19. 土木研究所資料 第2527号「高炉スラグ微粉末によるASR抑制に関する共同研究報告書」，1987年. p48 図6.4より作図.
20. 公共建築協会「建築工事監理指針2007年度版（上巻）」16節 高炉セメントB種を用いる普通コンクリート（アルカリ骨材反応抑制対策に使用する）.
21. 東日本旅客鉄道（株）編「土木工事標準仕様書」，日本鉄道施設協会，2010年.
22. 九州旅客鉄道（株）編「土木工事標準仕様書」，ジェイアール九州コンサルタンツ（株），2012年.
23. 川村満紀「講座第2回コンクリート構造物の耐久性上の問題点とその対策 アルカリ骨材反応（その1）」コンクリート工学誌，Vol.32，No.4，1994年4月.
24. 野田幹夫，小川 健，小柳 洽，川村満紀「凍結防止剤散布環境下におけるASRによるコンクリート構造物の損傷状況調査」コンクリート工学誌，Vol.36，No.9，1998年9月.
25. 大濱浩二，向井大吾，石井博典，檜村康介，石田哲也，田中康司「高炉セメントを用いたコンクリートによる高耐久床板の施工 —新気仙大橋—」橋梁と基礎，Vol.51，No.2，2017年2月.
26. 松岡弘大，仁平達也，伊藤正憲，山田久美「87年間供用されたRC鉄道高架橋スラブの劣化要因分析」，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，2015.
27. 石田哲也「コンクリート構造物長寿命化に資する品質保証／性能照査統合システムの開発」（国土交通省建設技術研究開発費補助金総合研究報告書），研究期間：2008～09年度.
28. 日本コンクリート工学協会「マスコンクリートのひび割れ制御指針」，2008年.
29. 藤原稔，行徳爲己，久保田賢，新崎義幸「低発熱型高炉セメントB種の特性と施工例」コンクリート工学誌，Vol.47，No.3，2009年3月.
30. 土木学会「コンクリート標準示方書」設計編，2017年，pp335-336の式と標準値より計算により求めた.
31. コンクリート工学協会「コンクリートの収縮問題検討委員会 報告書」，2010年.
32. セメント協会コンクリート専門委員会報告，F-55（追補），「各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究（コンクリートの乾燥収縮に関する実験結果）」，2011年3月.
33. 兵頭彦次，谷村充，藤田仁，番地成朋「石灰石骨材がコンクリートの収縮特性に及ぼす影響」コンクリート工学年次論文報告集，Vol.31，No.1，2009.
34. Davis.H.E. / Autogenous volume change of concrete, Proc40, 1940.

35. 三浦智哉, 田澤榮一, 宮澤伸吾, 保利彰宏「コンクリートの自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響」, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, 1995.
36. 日本建築学会「高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針(案)・同解説」, p197, 2017年9月.
37. 土木学会 コンクリート技術シリーズ 89, 「混和材料を使用したコンクリートの物性化と性能評価研究小委員会(333委員会) No.2, 2010年5月.
38. 金子樹, 中島正浩, 篠原克佳, 日高雅樹「晴海五丁目西地区における住宅整備」, コンクリート工学, Vol.58, No.5, 2020.
39. 吉田早智子, 細田 暁, 林 和彦, 内田晃一「表面吸水試験および透気試験による山口県の構造物の表層品質評価」, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011.
40. 稲津貴和子, 田村隆弘, 澤村修司「山口県のコンクリート工事に関するデータベースを用いたひび割れ幅に関する統計的評価」, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011.
41. 土木学会 コンクリート技術シリーズ No.124「コンクリート構造物の品質確保小委員会(第二期)(350委員会)委員会報告書」, 2020年8月.
42. 土木学会 コンクリートライブラリー 125, 「コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)」, 2005年11月.
43. 酒井秀昭, 横山博司, 高野茂晴, 前田悦孝「高炉スラグ微粉末(6000cm²/g)を用いた鋼橋のPCプレキャスト床版の検討」, プレストレストコンクリート, Vol.43, No.5, Sep.2001.
44. 建設省住宅局住宅生産課・建築研究所監修「住宅性能表示制度 評価方法・技術解説」, 理工図書(株), 2000年7月.
45. セメント協会編「セメントの常識」, 2020年1月.
46. 日本建築学会「高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工(案)・同解説」, p4, 2017年9月
47. 同上, p46, 2017年9月
48. 日本建設業団体連合会 「低炭素型コンクリートの普及促進に向けて」
<https://www.nikkenren.com/sougou/10thaniv/pdf/05-06-20.pdf>
49. コンクリート工学 Vol.59, No.9「特集 カーボンニュートラルに貢献するコンクリート技術」, 2021年9月
50. https://www.taisei.co.jp/giken/report/2020_53/paper/A053_005.pdf
51. https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2021/210216_5079.html
52. http://data.jci-net.or.jp/data_html/37/037-01-1029.html
53. https://www.taisei.co.jp/giken/report/2014_47/paper/A047_005.pdf
54. https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2021/210112_5022.html

55. 松田拓ら、持続可能性に貢献する超低収縮・低炭素コンクリート、コンクリート工学、58 巻 1 号、p. 84-89(2020)
56. <https://www.smcon.co.jp/topics/2018/02261300/>
57. http://dokaikyo.or.jp/back_number/kaishi_new/306t_12.pdf
58. https://www.toda.co.jp/news/2021/20210719_002955.html
59. https://www.obayashi.co.jp/technology/shoho/080/2016_080_21.pdf
60. <https://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201705ecm/index.html>
61. https://www.haseko.co.jp/hc/information/upload_files/20201030_1.pdf
62. <https://www.tokyu-cnst.co.jp/topics/assets/1d6a7efaedeed746b6702b874bf67a2653909dfe.pdf>
63. https://www.ad-hzm.co.jp/tr/kankyuu/energy/energy_04.html
64. https://www.ad-hzm.co.jp/solution/energy_saving/detail_01/
65. https://www.haseko.co.jp/hc/information/upload_files/20210112_01.pdf
66. NEXCO 中日本編「環境配慮型コンクリート設計・施工管理要領（低炭素型コンクリート編）」、2023 年 11 月

鐵鋼スラグ協会の会員各社・団体

(株)神戸製鋼所	山陽特殊製鋼(株)	JFE スチール(株)
大同特殊鋼(株)	(株)中山製鋼所	日本製鉄(株)
(株)デイ・シー	日鉄高炉セメント(株)	日鉄セメント(株)
日鉄スラグ製品(株)		
協材砕石(株)	JFE ミネラル(株)	清新産業(株)
(株)テツゲン	東方金属(株)	日清鋼業(株)
日本磁力選鉱(株)	濱田重工(株)	
(一社)日本鉄鋼連盟	普通鋼電炉工業会	

鐵鋼スラグ協会

本 部 〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町 3-2-10(鉄鋼会館 5F)
TEL 03-5643-6016 FAX 03-5643-6018
URL <https://www.slg.jp>
大阪事務所 〒550-0002 大阪市西区江戸堀 1-10-27(肥後橋三宮ビル)
TEL 06-6448-5817 FAX 06-6448-5805
(非売品)

本冊子は鐵鋼スラグ協会ホームページからダウンロードできます。
本冊子ご希望の方、また、説明をご要望される方は当協会へご連絡ください。