CO_2 排出量を削減した高強度環境配慮コンクリートの開発と二次製品化による実用化展開

大成建設(株)　正会員　○松元　淳一　堀口　賢一
木村　利秀　橋本　聡
須貝　文彦　山梨　達哉
澤上　晋

1．はじめに

わが国は「2050 年カーボンニュートラル」を宣言し，2030 年度の温室効果ガスの排出を 2013 年度比で 46%削減することを目標としている．日本政府は温暖化への対応としてグリーン成長戦略を打ち出した．これを受けて，社会全体のカーボンニュートラルへの移行が進んでおり，各方面において CO_2 排出量を抑制することが試みられている．社会インフラの構築に重要なコンクリートは，材料の製造過程において 1m³ あたり 250～350kg の CO_2 を排出する．この排出量の多くは使用するポルトランドセメントの製造に起因するため，CO_2 排出原単位がポルトランドセメントよりも小さいコンクリート用混和材を積極的に使用することで，CO_2 排出量を抑制した環境配慮コンクリートを製造できる．

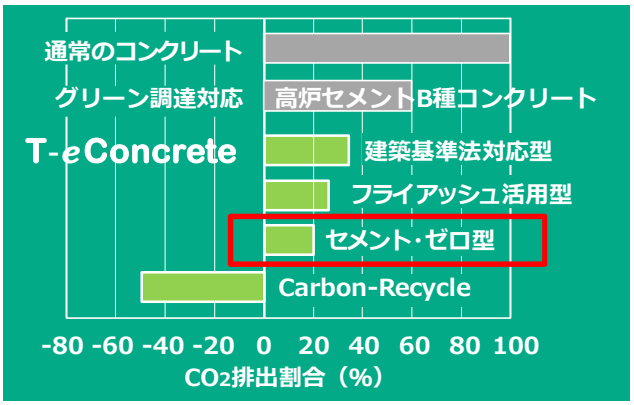


図-1　環境配慮コンクリートの CO_2 排出削減効果

このような背景のもと，**図-1** に示すような，ポルトランドセメントの使用量を“ゼロ”にした，セメント・ゼロ型の環境配慮コンクリート（以下，セメント・ゼロ型と称する）として，ポルトランドセメントの代わりに製鋼副産物である高炉スラグ微粉末とカルシウム系化合物を用い，通常のコンクリート（ポルトランドセメントを用いた同一強度レベルのコンクリート）に対して，CO_2 排出量を 80%程度削減できる環境配慮コンクリートを開発した[1)~5)]．しかしながら，セメント・ゼロ型は，粘性が高いことによる施工性や，初期強度や高強度化にかかわる強度発現性が低いといった課題があり，通常のコンクリートと同様に一般的な場所打ちコンクリート構造物にそのまま適用することは難しい．

この課題解決に向けて，コンクリート二次製品に着目した．コンクリート二次製品は，工場内の振動台の上で製作することが多く，従来から型枠の早期転用を図るために蒸気養生などの給熱養生を行っており，環境配慮コンクリートの製作性や強度発現性の課題を解決できると考えた．しかしながら，セメント・ゼロ型の配合は，強度発現性を高めると粘性も高くなるため，製作性が著しく低下する特徴を有しており，コンクリート二次製品でも製作が難しかった．そのため，高炉スラグ微粉末や刺激材の種類や量を幾通りも組合せ，強度発現性や粘性と製作性のバランスを取りつつ，低コスト化を考慮したセメント・ゼロ型の配合を詳細に検討した．さらには，二次製品製作に適した低コストの高強度環境配慮コンクリートの製造･品質管理技術を確立し[6),7)]，その結果として，セメント・ゼロ型の社会実装が可能となり，シールドトンネル工事などでの実用化の実績を積み上げている[6),7)]．ここでは，技術の確立のための実験結果と実用化展開状況について述べる．

2．技術の概要

(1) セメント・ゼロ型高強度環境配慮コンクリート配合の特徴

セメント・ゼロ型の配合例を**表-1** に示す．セメント・ゼロ型は，スランプ 3cm の硬練り仕様からスランプフ

キーワード　環境配慮コンクリート，セメント・ゼロ型，カーボンニュートラル，二次製品化，実用化展開
連絡先　〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設（株）技術センター社会基盤技術研究部　ＴＥＬ045-814-7255

ーロー650mm の高流動仕様まで，広い範囲で配合を設計することができる[2]．**表-1** の配合では，1m³ のコンクリートの材料製造に関わる CO_2 排出量は 329kg から 88 kg となり 73%削減できる．

セメント・ゼロ型の環境配慮コンクリートを構成する材料のうち，結合材には高炉スラグ微粉末，消石灰，膨張材のみを使用し，ポルトランドセメントは一切使用しない．骨材は従来のコンクリートで使用している材料と同じで，全ての材料が JIS に適合しており，特殊な材料は用いておらず，この配合は汎用性が高い． セメント・ゼロ型の配合による二次製品を，実際の製作ラインで製作するためには，高強度化によるコンクリートの粘性増加とそれによる製作性の低下に対して，両性能のバランスを取れる配合を選定する必要があった．粘性と製作性のバランスは，**図-2** に示すように，単位結合材量の増加に伴う，粘性や材料分離抵抗性との関係として示される．このように，強度発現性を高めると同時に粘性も高まるため，製作性は低下する（**図-2** の**写真-3**）．一方．製作性を高めるために粘性を低下させようとすると強度発現性が低下し，また同時に材料分離を生じやすい状態になる（**図-2** の**写真-1**）．このように粘性や強度発現性，および製作性は，ここで使用している高炉スラグ微粉末，消石灰，膨張材の量の組合せに大きく依存していることがわかり，双方のバランスの取れた配合を選定するに至った（**図-2** の**写真-2**）．なお，バランスの取れた配合の範囲で，材料の使用量を低減してコストの削減にも努めたことで，二次製品工場での製作が可能となり，いずれの二次製品工場でも同等の強度発現性が得られる，品質管理を行いやすい配合となっている．

表-1　セメント・ゼロ型高強度環境配慮コンクリート（圧縮強度 50N 程度）の配合例

	水結合材比（%）	細骨材率（%）	単位量（kg/m³）							CO_2排出量（kg/m³）
			水	セメント	高炉	刺激材	細骨材	粗骨材	混和剤	
環境配慮コンクリート	25	33	160	—	555	85	551	1045	4.64	88.1
現状の配合	39	40.5	154	395	—	20	753	1110	2.25	328.9

※“現状の配合”とは環境配慮コンクリートと同一強度レベルの普通コンクリート配合



写真-1　材料分離した状態



写真-2　適正な状態

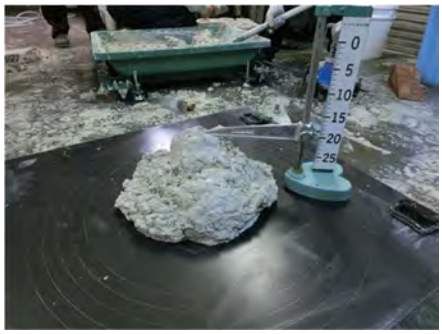


写真-3　粘性過多な状態

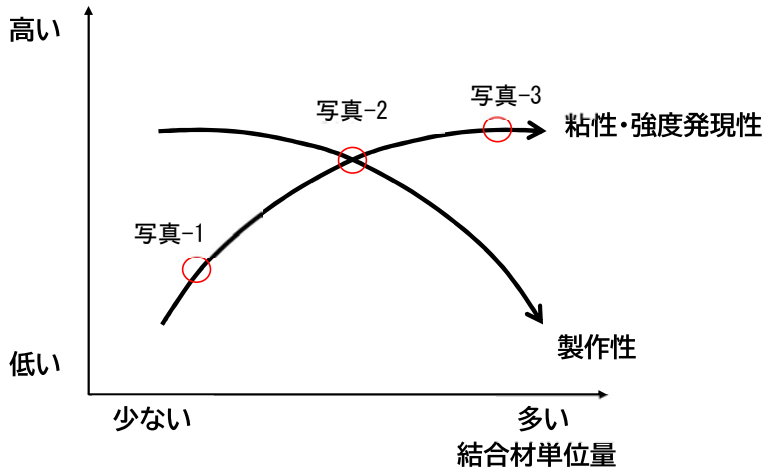


図-2　粘性・強度発現性と製作性の関係（概念図）

(2) セメント・ゼロ型のコンクリートの二次製品の強度発現性

図-3 にセメント・ゼロ型の圧縮強度の経時変化を示す．強度発現性の特徴として，

材齢初期：蒸気養生により初期強度が発現するため，型枠脱型は従来のコンクリートと同様にできる．

材齢中長期：高炉スラグ微粉末を多量に使用しているため，従来のコンクリートよりも強度が増進する．

圧縮強度発現性は，使用材料の違いなどの影響により，製造会社ごとに異なることが多い．今回の実験の検討範囲内によれば，強度発現性として，上述のように適切は結合材バランスで配合を定めたことで，脱型初期の圧縮強度は蒸気養生の有無によって，工場間の違いによる強度差は認められるが，脱型後以降はその差も小さく，品質を管理しやすいと考えられた．

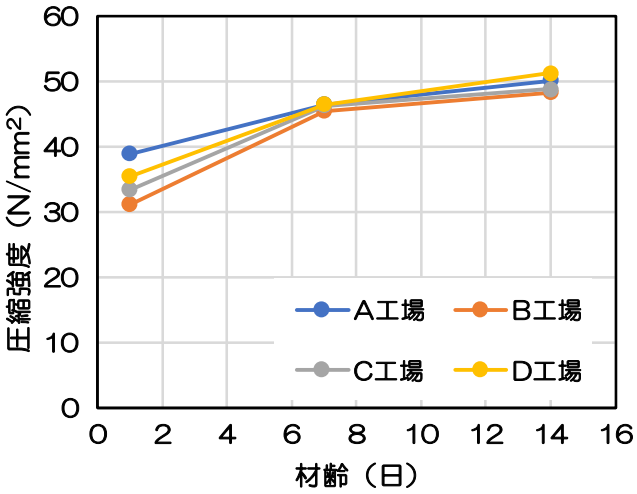


図-3　圧縮強度発現性

(3) セメント・ゼロ型コンクリート二次製品の製作性

写真-4に環境配慮コンクリートの打込み状況を示す．環境配慮コンクリートは粉体量が多いため，高粘性であるが，実際の工場ラインで展開できる配合を選定したことにより，打込み性能は良好であり，特殊な機材等を設けなくても，従来のコンクリートと同じように打込みをすることができる．一例として，セグメント中央頂部とセグメント端部でコアを採取して，骨材分布の状況を目視により比較した．コア表面の状況を**写真-5**に示す．セグメント端部における粗骨材の分布状況は，中央頂部の打込み位置で採取したコアと殆ど同様であり，型枠端部まで材料分離せずにコンクリートが充填されていることを確認できた．

写真-6にコテ仕上げ状況を示す．粘性が高いため，コンクリートを均すことに若干の時間を要したが，通常のコンクリートと同じく，良好な仕上げ性であった．脱型後の外観についても，ひび割れや色むらなどの変状は認められず，さらに，寸法検査においても，0mm～＋1.0mm内の許容範囲にあった（**写真-7**）．



写真-4　セグメント型枠への打込み状況



写真-5　骨材分布状況



写真-6　セグメントの仕上げ状況



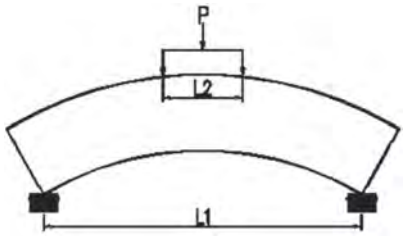
写真-7　セグメント脱型後の外観

(4) セメント・ゼロ型のコンクリート二次製品の構造性能・組立性の特徴

高強度環境配慮コンクリートのひび割れ発生時の荷重は，実際の工事における設計荷重を上回っており，十分な曲げ性能を有している．**表-2** には，一例として，実物セグメントの曲げ試験結果を示した．試験方法は**図-4** に示すような 2 点曲げ載荷である．環境配慮コンクリートセグメントのひび割れ発生時の荷重，終局荷重はそれぞれ 146kN，414kN であり，実際のシールド工事における設計荷重 118kN，終局荷重 263kN を大幅に上回っており，また，同一強度レベルの通常の普通コンクリートに比べて，ひび割れ発生荷重は同程度，終局荷重は大きくなる結果であった．

表-2　実大セグメントの曲げ試験結果

	規格値 (kN)	環境配慮コンクリート (kN)	通常普通コンクリート (kN)
ひび割れ発生荷重	—	146	140
設計荷重	118	—	—
終局荷重	263	414	385



L1:3267mm，L2：900mm

図-4　実大セグメントの曲げ試験方法

(5) セメント・ゼロ型のコンクリート二次製品の耐久性・物性（収縮特性）

表-3 には，通常の高炉セメント B 種コンクリートに対する環境配慮コンクリートの耐久性評価・物性結果を示す．コンクリートの劣化に対する抵抗性は，通常のコンクリートと同等以上の性能を有していることを確認している[2)]．そのなかで，凍結融解に対する抵抗性についても二次製品が置かれる環境や，化学混和剤を選定してエントレインドエアを 6%程度以上導入すればその十分な抵抗性を有していることが分かった．

環境配慮コンクリートは高炉スラグ微粉末を多量に使用するため，収縮が大きくなると予想されるが，刺激剤の一部に膨張系の材料を用いるなどの配合上の工夫を行ったことで，乾燥収縮ひずみは通常のコンクリートよりも小さい結果であった．

表-3　高強度環境配慮コンクリートの耐久性評価・物性評価

耐久性・物性評価項目	高炉セメント B 種コンクリートに対する，セメント・ゼロ型の耐久性
中性化に対する抵抗性	○設計かぶりに対して十分に余裕があるため，鋼材腐食は生じない．
塩分浸透抵抗性	◎同等以上
凍結融解抵抗性	○エントレインドエアを 6%程度以上導入することにより凍結融解抵抗性が確保できる．
硫酸塩に対する抵抗性	○同等
硫酸に対する抵抗性	○同等
乾燥収縮ひずみ	○150×10^{-6} 程度以下と小さい

(6) 環境配慮コンクリートの高強度二次製品製造時の管理項目と記録

セメント･ゼロ型の二次製品の製作時には，配合や使用材料，計量や骨材の表面水率等の練混ぜに係る項目，スランプ等のコンクリート性状に係る項目，強度発現および製品寸法，外観等の製品に係る項目それぞれの管理・記録を徹底することで，欠陥のないセメント・ゼロ型の二次製品を製造・適用することができている．

3．二次製品の実用化展開による効果

(1) 環境保全への効果（CO_2 排出削減量）

セメント・ゼロ型の高強度二次製品におけるコンクリート使用材料製造時の CO_2 排出量をセメント協会，

土木学会，石炭製造工業会の資料を参考に算出すると，通常のコンクリート（CO_2 排出量：329kg/m^3）に対して，セメント・ゼロ型（CO_2 排出量：88kg/m^3）に変更することで，CO_2 排出削減量は 240kg/m^3 となり，本技術による適用実績全体での CO_2 排出削減量は 1,920 トンである．林野庁の資料によれば，36～40 年生スギ人工林 1 ヘクタールが 1 年間に吸収する CO_2 の量は 8.8 トンと示されていることから [8]，本技術の効果として，36～40 年生スギ人工林 218 ヘクタールが 1 年間に吸収する CO_2 を削減したことに相当するものである．

（2）コスト低減の効果

本開発技術の初期段階では，材料費は普通コンクリートに比べて 5～10%高くなっていたが，多くの工事での実用化を進めたことにより調達コストを低減でき，従来の普通コンクリートと同等程度となった．また，本開発技術による材料コストと CO_2 排出量の関係にて試算すると，13,000 円で 1 トンの CO_2 削減が可能である．その一方で，国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構の技術開発総合指針 2020 によれば [9]，2030 年の CO_2 削減予測コストは，CO_2 削減 1 トン当たり 36,000～39,000 円であり，本開発技術によれば他の手法による場合よりも大幅にコストを削減できる．

（3）実用化展開の状況

セメント・ゼロ型の環境配慮コンクリートは 2021 年度より二次製品の実用化を開始し，現時点で 6 件の実構造物で合計約 8,000m^3 に適用している．

a）セグメント部材

下水環境に置かれるシールドトンネルに設置する RC セグメント，合成セグメント，それぞれ 5 リングの計 40.5m^3 に適用した．欠陥もなく，良好なセグメントが設置できている．



A）RC セグメント設置状況　　B）RC セグメント設置後　　C）合成セグメント設置後

写真-8　シールドセグメント設置状況

b）インバート

シールドトンネル内の床材であるインバートに 6990 基，計 7955m^3 適用している．



A）製作状況・設置後（現場 A）　　B）設置後（現場 B）

写真-9　シールドインバート設置状況

c）道路側溝

道路側溝部材として，上述の配合を用いて 29 基，6.5m³ 適用している．



A）道路側溝 PCa 製品



B）現場設置状況

写真-10　道路側溝 PCa 製品設置状況

６．まとめ

本検討では，CO_2 排出量を大幅に削減できるセメント・ゼロ型の高強度環境配慮コンクリートの配合選定手法，品質管理手法を確立した．ここでは，セメント・ゼロ型に特有の高粘性という施工に不利な条件を克服したことにより，圧縮強度が 50N/mm² を超える高強度なコンクリート二次製品での適用が可能になったことで，シールドセグメントといった構造部材への適用を実現した．また，二次製品間での品質のばらつきも管理できるようになったことで，いずれの二次製品工場でも製作できるようになり，構造物での適用事例を積み重ねることができた．

今後も本技術の活用の場は広がっていくことが見込まれており，CO_2 排出量の削減に寄与できる技術として活用が期待できると考えられる．

参考文献

1) 荻野正貴，大脇英司，白根勇二，中村英佑：複数の環境に約 2 年間曝露した低炭素型のコンクリートの強度と耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.220-225，2014.7
2) 堀口賢一，松元淳一，河村圭亮，坂本淳：低炭素型コンクリートを使用したコンクリート二次製品の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.213-218，2016.7
3) 大脇英司，宮原茂禎，岡本礼子，荻野正貴，坂本淳，丸屋剛：環境配慮コンクリートの基本性状，大成建設技術センター報，Vol.47，No.06，pp.06-1-06-6，2014.12
4) 混和剤を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針，コンクリートライブラリー152，土木学会，平成 30 年
5) 松元淳一，堀口賢一，坂本淳：環境配慮コンクリートを使用したセグメントの実用化検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，Vol.18，No.131，2018.10
6) 松元淳一，直町聡子，堀口賢一，木村利秀：環境配慮コンクリートを使用したセグメントの性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1019-1024，2021.7
7) 松元淳一，直町聡子，堀口賢一，畑明仁，木村利秀，中野文裕，小森敏生，沖慎一郎：環境配慮コンクリートセグメントのシールドトンネルへの適用
8) 林野庁 HP：https://www.rinya.maff.go.jp/j/sin_riyou/ondanka/20141113_topics2_2.html
9) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構の技術開発総合指針 2020