

CO₂排出量を大幅に削減した 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

松元 淳一^{*1}・堀口 賢一^{*1}・直町 聰子^{*1}・木村 利秀^{*2}・
橋本 聰^{*3}・須貝 文彦^{*4}・山梨 達哉^{*5}・澤上 晋^{*6}

Keywords: carbon neutral, environmentally friendly concrete, cement-zero type, high strength concrete products

カーボンニュートラル, 環境配慮コンクリート, セメント・ゼロ型, 高強度コンクリート二次製品

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, 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CO₂排出量を抑制することが試みられている¹⁾。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CO₂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, CO₂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, CO₂排出量を抑制した環境配慮コンクリートを製造できる。

このような背景のもと, 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, CO₂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^{2)~7)}。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現状は難しい。

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, セメント・ゼロ型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, さらに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い。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, さらには, 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, 最終的に二次製品製作に適した低コストの高強度のセメント・ゼロ型の製造・品質管理技術を確立した。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の実用化の実績を積み上げていっている段階となつた。なお, ここでの高強度とは40N/mm²以上の強度発現性を有しているものである。

2. 高強度環境配慮コンクリート技術の概要

2.1 高強度セメント・ゼロ型コンクリートの配合の特徴

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

*1 技術センター 社会技術研究部 先端基盤研究室

*2 土木本部 土木設計部

*3 千葉支店 土木部

*4 関西支店 営業部

*5 土木本部 土木設計部

*6 土木本部 土木企画部

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/mm²程度)の配合例

Table 1 Mixing example of cement zero type high strength environmentally friendly concrete

	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)								CO ₂ 排出量 (kg/m ³)
			水	セメント	高炉	消石灰	膨張材	細骨材	粗骨材	混和剤	
環境配慮コンクリート	25	33	160	—	555	55	30	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

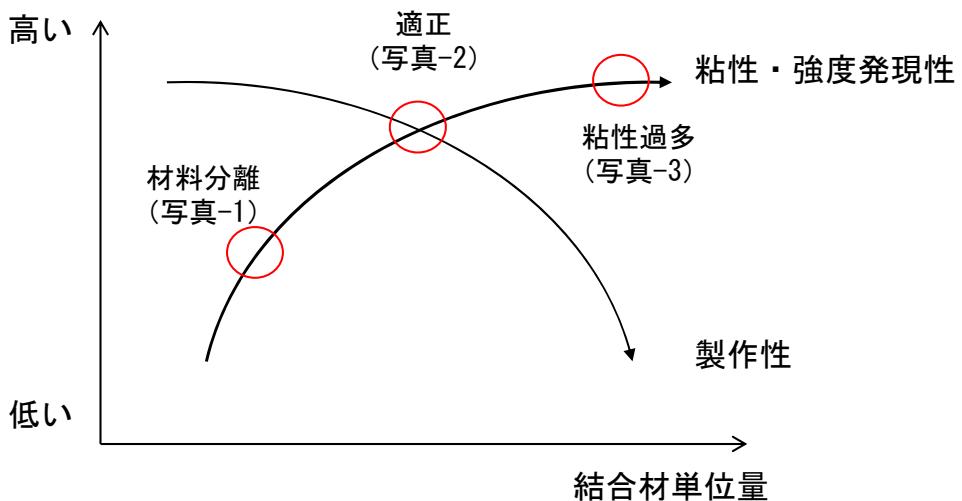


図-1 粘性・強度発現性と製作性の関係(概念図)
Fig.1 Relationship between viscosity/strength development and manufacturability



写真-1 材料分離の状態
Photo.1 Condition of material separation

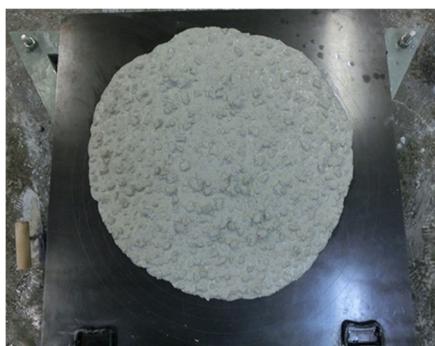


写真-2 適正な状態
Photo.2 Proper condition

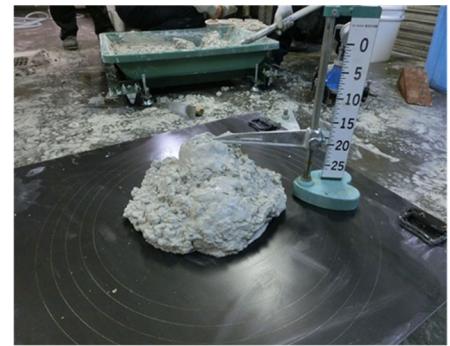


写真-3 粘性过多な状態
Photo.3 Excessive viscosity

プローフロー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。表-1の配合では、1m³のコンクリートの材料製造に関わるCO₂排出量は329kgから88kgとなり73%削減できる。

セメント・ゼロ型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更なる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。図-1に粘性・強度発現性と製作性のバランス、すなわち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す。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(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(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ため、セメント・ゼロ型の配合選定技術開発ではコンクリートの試験練りを繰返し、最終的に200通りほどの試験の結果からバランスの取れた配合を選定するに至った(写真-2)。また、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より、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た。

2.2 高強度セメント・ゼロ型の強度発現性

セメント・ゼロ型の圧縮強度発現性を図-2に示す。特徴として、材齢初期は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。その一方で、材齢中長期では、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傾向にあった。

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。セメント・ゼロ型の配合による強度発現性として、上述のように適切な結合材バランスで配合を定めることにより、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ものであった。

2.3 二次製品の製作性

写真-4にセグメント型枠への打込み状況を示す。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、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た。

一例として、写真-5に示すように、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ところ、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なくコンクリートの充填が認められた。

2.4 二次製品の構造性能・組立性

セメント・ゼロ型のひび割れ発生時の荷重、破壊荷重は、実際の工事における設計荷重、終局荷重を大幅に上回っており、十分な曲げ性能を有している。また、同一強度レベルの従来のコンクリートと比較して、ひび割れ発生荷重や終局荷重も同程度となることを確認している。

また、セグメントの組立性についても、ひび割れや角欠け等が生じることもなく、良好であった。

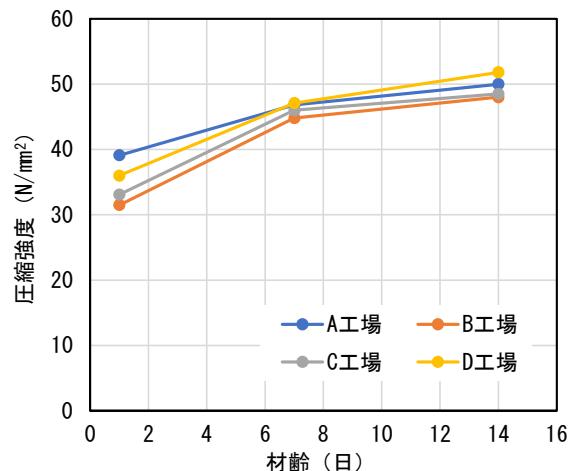


図-2 圧縮強度発現性
Fig.2 Compressive strength development



写真-4 セグメント型枠への打込み状況
Photo.4 Casting into segment formwork

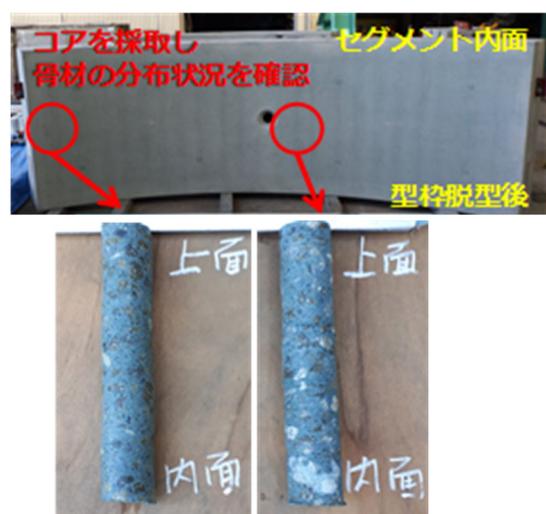


写真-5 骨材分布状況
Photo.5 Aggregate distribution status

表-2 高強度環境配慮コンクリートの耐久性評価・物性評価
Table2 Durability and properties evaluation of high-strength environmentally friendly concrete

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、中性化による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	○膨張材を用いるなどの配合上の工夫もあり、 150×10^{-6} 程度以下と小さい

2.5 二次製品の耐久性・物性

表-2に通常の高炉セメントB種コンクリートに対するセメント・ゼロ型の耐久性・物性結果を示す。ここでの、通常の高炉セメントB種はセメント・ゼロ型と同一強度レベルのコンクリートである。

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た。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認められている。

高強度セメント・ゼロ型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、高強度レベルで、かつ膨張材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くなることを確認している。

2.6 二次製品の管理項目と記録

高強度セメント・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、これま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. 高強度環境配慮コンクリートの現場実装 とその効果

3.1 現場実装の実績

高強度セメント・ゼロ型の現場実装は2021年度より

始まり、2023年度8月時点で以下の6件の実構造物で適用している。

① 適用実績1 (写真-6)

- ・適用部材：シールドトンネル用セグメント
- ・適用数量：5リング (コンクリート： $35m^3$)

② 適用実績2 (写真-7)

- ・適用部材：シールドトンネル用インバート
- ・適用数量：12基 (コンクリート： $26.5m^3$)

③ 適用実績3 (写真-7)

- ・適用部材：シールドトンネル用インバート
- ・適用数量：5,790基 (コンクリート： $629m^3$)



写真-6 シールドトンネル用セグメント
Photo.6 Shielded tunnel segments



A) インバート製造・型枠脱型後



B) インバート設置後

写真-7 シールドトンネル用インバート
Photo.7 Shielded tunnel invert

④ 適用実績4（写真-8）

- ・適用部材：シールドトンネル用合成セグメント
- ・適用数量：5リング（コンクリート：10.5m³）

⑤ 適用実績5（写真-9）

- ・適用部材：道路側溝
- ・適用数量：29基（コンクリート：6.5m³）

⑥ 適用実績6（写真-10）

- ・適用部材：シールドトンネル用インバート
- ・適用数量：1,189基（コンクリート：7,300m³）

3.2 現場実装の効果

3.2.1 環境保全への効果（CO₂排出削減量）

上述の現場実装について、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CO₂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（CO₂排出量：329kg/m³）に対して、セメント・ゼロ型（CO₂排出量：88kg/m³）に変更することで、CO₂排出削減量は240kg/m³となり、本技術による適用実績全体でのCO₂排出削減量は1,920ton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CO₂の量は8.8tonと示されていることから、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CO₂を削減したことには相当するものであった。



3.2.2 コスト削減効果

高強度環境配慮コンクリートのうち、セメント・ゼロ型の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、本技術の材料コストとCO₂排出量の関係にて試算すると、13,000円で1トンのCO₂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、2030年のCO₂削減予測コストは、CO₂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ことがわかる。

4. まとめ

本技術では、CO₂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50~60N/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つたことで、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、CO₂排出量の削減に寄与できる技術として活用が期待されている。

また、CO₂を利用して混和材を製造し、その材料をセメント・ゼロ型に混入したカーボンリサイクルコンクリートの開発も進められており⁸⁾⁻¹⁵⁾、2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、環境配慮コンクリートの更なる技術開発や実用化展開を促進する。

謝 辞

この成果は、コンクリート二次製品製造工場ほか、関係各位に多大なご協力を頂きました。関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) 野口貴文：2050年カーボンニュートラルに対するコンクリート二次製品の開発とその実用化展開、大成建設技術センター報 第56号(2023)
- 2) 萩野正貴、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
- 3) 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
- 4) 大脇英司、宮原茂徳、岡本礼子、萩野正貴、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
- 5) 松元淳一、直町聰子、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
- 6) 土木学会：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、平成30年
- 7) 土木研究所、大成建設：低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書（VI）—高炉スラグ微粉末を結合材とした低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル（案）—、平成28年1月
- 8) 萩野正貴、大脇英司：炭酸カルシウムを利用したカーボンリサイクル・コンクリートの基本性状について、コンクリート工学年次論文集、Vol.45、No.1、2023.
- 9) 梅津真見子ほか：リサイクル炭酸カルシウムを添加したコンクリートの基本性状、第78回土木学会年次学術講演会、V-588、2023.
- 10) 梅津真見子ほか：廃石膏ボードを原料とした合成炭酸カルシウムを添加したコンクリートの基本的品質、コンクリート工学年次論文集、Vol.46、2024.
- 11) 萩野正貴ほか：T-eConcrete®/Carbon-Recycleの適用事例、大成建設技術センター報、No.56、pp.04-1~04-8、2023.
- 12) 近藤祥太ほか：廃石膏から合成した炭酸カルシウムを添加したコンクリート製品の製造と耐久性、コンクリート工学年次論文集、Vol.46、2024.
- 13) 萩野正貴ほか：リサイクル炭酸カルシウムを添加したコンクリートを用いた二次製品の製造（その1）、第78回土木学会年次学術講演会、V-589、2023
- 14) 畑明仁ほか：リサイクル炭酸カルシウムを添加したコンクリートを用いた二次製品の製造（その2）、第78回土木学会年次学術講演会、V-590、2023
- 15) 大脇英司ほか：T-eConcrete®/Carbon-Recycleの特徴と社会実装例、電力土木、No.421、pp.70-74、2022.