

コンクリートにおける 脱炭素化の取り組み



上原 元樹
Motoki Uehara
材料技術研究部
コンクリート材料研究室長

はじめに

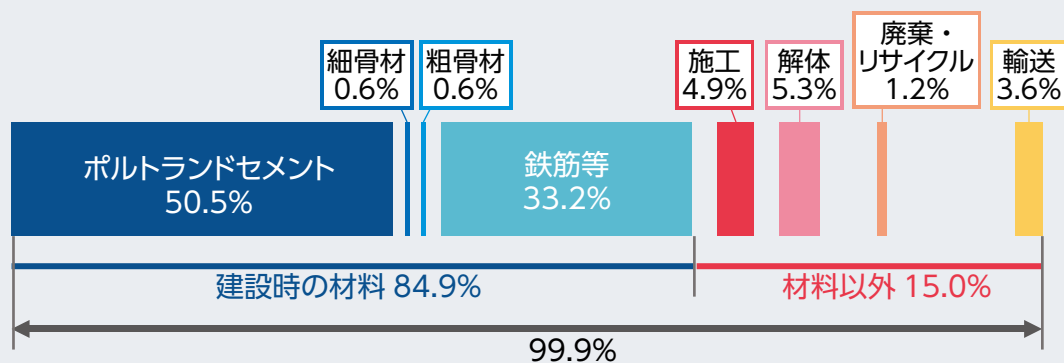
2050年のカーボンニュートラルの実現に向けて、あらゆる産業がCO₂削減に取り組んでいます。コンクリートで、この目標を実現するためには、コンクリートのCO₂排出由来を把握することが重要です。図1は100m³の鉄筋コンクリートのライフサイクルにおけるCO₂排出量の算定例です¹⁾。施工、解体、廃棄・リサイクル、輸送の比率が小さく、建設時の材料、特にポルトランドセメント[®]（以下、セメントと略す）と鉄筋の製造に由来するCO₂排出量が多いことがわかります。また、解体や再利用でコンクリートが固定化するCO₂量は、ライフ

サイクル全体のCO₂排出量の約5.5%と試算されており、解体、廃棄・リサイクル工程の排出量をほぼ相殺するといわれています¹⁾。したがって、コンクリートの脱炭素化は、建設時の材料の低炭素化が重要です。ここで、鉄鋼材料はリサイクルした電炉品を用いるなど、その低炭素化が進められていますが、詳細はほかの記事で紹介されていることから、その他の材料の低炭素化技術を紹介します。

セメントの製造はなぜCO₂を多く排出するのか

セメントの主材料は天然に産出する石灰石

図1 鉄筋コンクリートの各工程がCO₂排出量に占める割合



※文献1のデータをもとに作成

ポルトランドセメント

ポルトランドセメントのポルトランドとは、イギリスで盛んに使われたポルトランド島の石材に色調が似ていることに由来します。1824年にイギリスのジョセフ・アスペディンが取得した特許で初めてポルトランドセメントという用語が使われています。

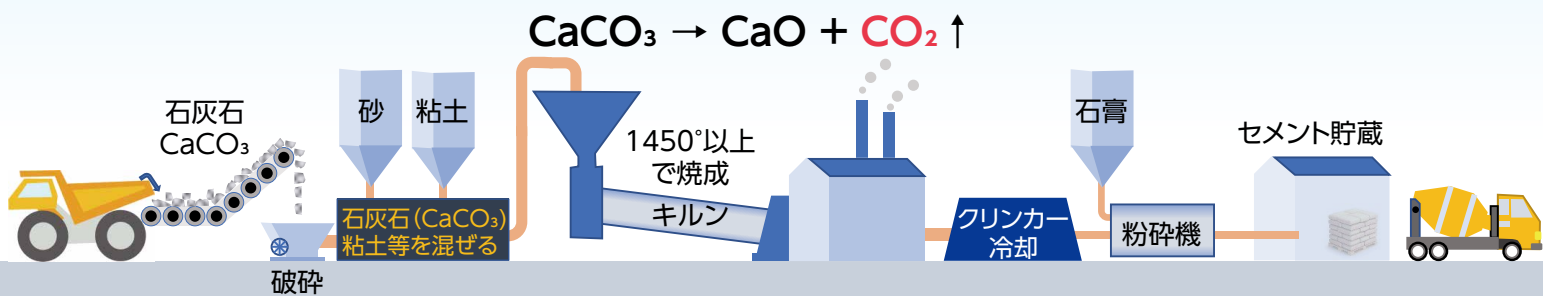


図2 セメント製造の模式図

(CaCO₃)です。セメントは、この石灰石と種々の原料を混合した後、重油や石炭を燃やして1450℃以上とした回転釜(キルン)中で焼成して作製します。この高温環境でCaCO₃は分解されてCO₂が発生します(図2)。セメント製造におけるCO₂のほとんどは、この燃料と石灰石に由来します。

コンクリートにおける脱炭素化の技術

コンクリート製造時のCO₂削減方法は、大きく分けて三つです。

(1)セメント使用量の削減

一つ目は、セメント使用量の削減です。表1

はコンクリートの原材料を1t製造するときのCO₂発生量の一例です²⁾³⁾。セメントの影響が大きいことがわかります。そこで、製鉄所や石炭火力発電所の副産物である高炉スラグやフライアッシュをセメントと置換したものが高炉セメントやフライアッシュセメントです。このようにセメントの使用量削減が、CO₂の削減に結びつくため、種々の方法で低セメントコンクリートが開発されており、鉄道総研で研究している「ジオポリマー」[®]もその一つです。

(2)CO₂固定化材料

二つ目は工場の排ガスなどに含まれるCO₂を利用して製造したCO₂固定化材料を骨材や

® ジオポリマー

ジオポリマーは、地球を表す「ジオ」と重合体を表す「ポリマー」を合わせた造語です。地球上の岩石と生成の仕方が似ていることから名付けられました。ジオポリマーとは「セメントクリンカーを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料(活性フィラー)とアルカリ金属のケイ酸塩、炭酸塩、水酸化物水溶液の少なくとも1種類を用いて硬化させたもの」と日本コンクリート工学会の「建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会」は定義しました。この定義からもわかるように、種々の材料で構成されるジオポリマーが研究開発されており、その性質を「ジオポリマー」としてひとくくりにはできません。

表1 コンクリート原材料のCO₂原単位

材料	CO ₂ 原単位 (kg-CO ₂ /t)
普通ポルトランドセメント	764.3
早強ポルトランドセメント	765.5
高炉スラグ微粉末 4000	26.5
フライアッシュⅡ種	19.6
シリカフューム	19.6
細骨材	2.9
粗骨材	3.7
水	0.2
苛性ソーダ(濃度100%換算)	938

※各値は文献2, 3から抜粋

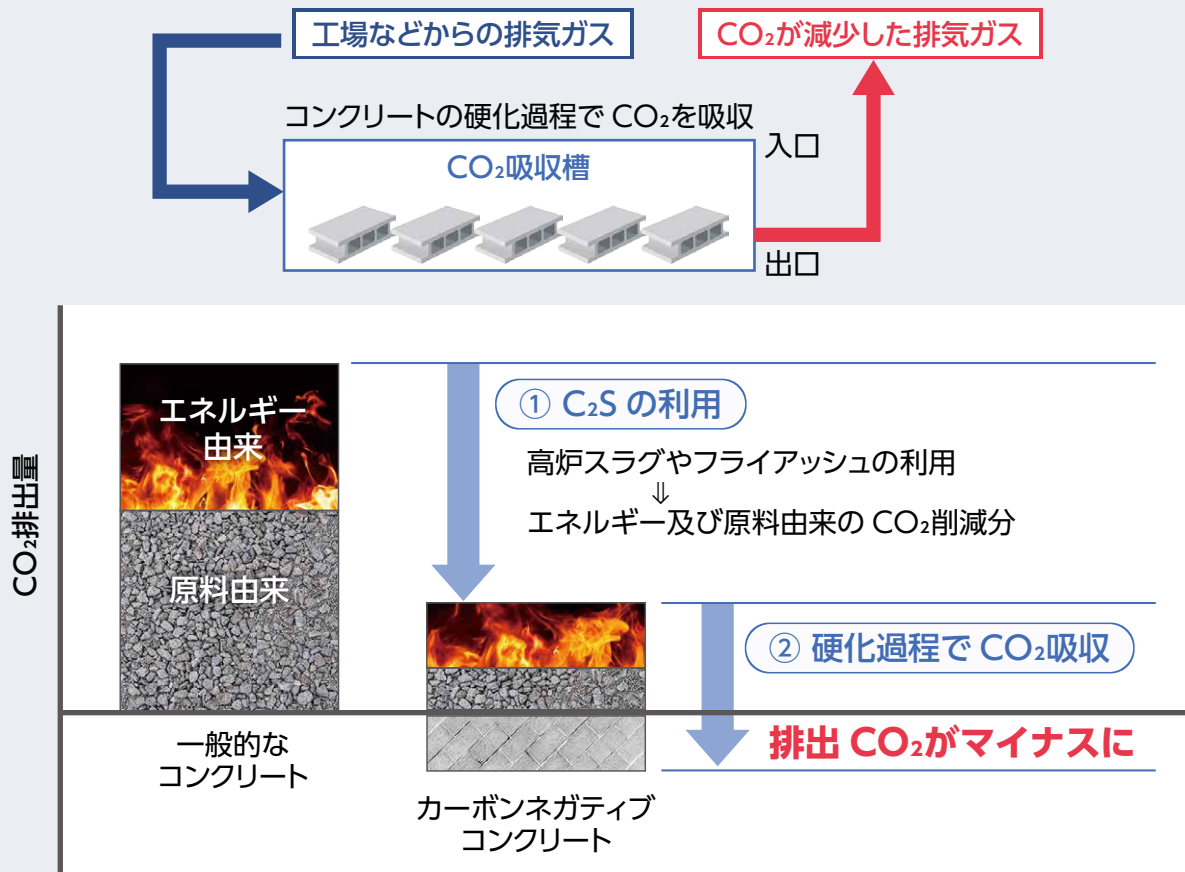


図3 CO₂を積極的に利用するコンクリートおよびのカーボンネガティブとなるCO₂削減効果の概念図

混和材として使用する方法です。例えば、工場のボイラーのCO₂排ガスと高アルカリ排水から炭酸カルシウム (CaCO₃) が作られます。このような廃棄するCO₂を固定化した材料を骨材や混和材などに使用したコンクリートは、その分CO₂を削減したことになります。

(3)CO₂吸収によるカーボンネガティブコンクリートの創出

三つ目はCO₂を利用して、新たなコンクリートを作ることです(図3)。例えば、2CaO・SiO₂ (略称C₂S)^④の一部はCO₂を吸収します。こ

④ 2CaO・SiO₂ (C₂S)

セメントクリンカーの主要成分の一つです。硬化反応が遅く、長期強度に貢献する物質です。C₂Sの異なる結晶相としてα、α'H、α'L、β、γ相の存在が知られており、クリンカーの主なC₂Sはβ相が主体となりますが、成分比や焼成温度条件により各相を製作することが可能です。

ここで、例えばC₂S (ここではγC₂S)の製造にセメント同様に天然の石灰石 (CaCO₃) を使用しては695.6kg/tと多くのCO₂を発生してしまいます⁴⁾。そこで、例えば化学工場副産物の消石灰 (Ca(OH)₂) を使用すれば、CO₂が発生せず、CO₂原単位は159.3kg/tと低くなります⁴⁾。図3のように、コンクリートを製造するときにセメントを使用せず、このC₂Sと高炉スラグやフライアッシュを使用すれば、原料およびエネルギー由来のCO₂が大幅に減ります(図3の①の部分)。加えて、工場や火力発電所のCO₂排気ガスを大気に放出せず硬化時に吸収させます(図3の②の部分)。その吸収量が、この原料とエネルギー由来のCO₂発生量を上回ることによってコンクリート製造ごとにCO₂収支がマイナスになる、いわゆる「カーボンネガティブ」も可能です。コンクリート製造時のCO₂削減技術に加え

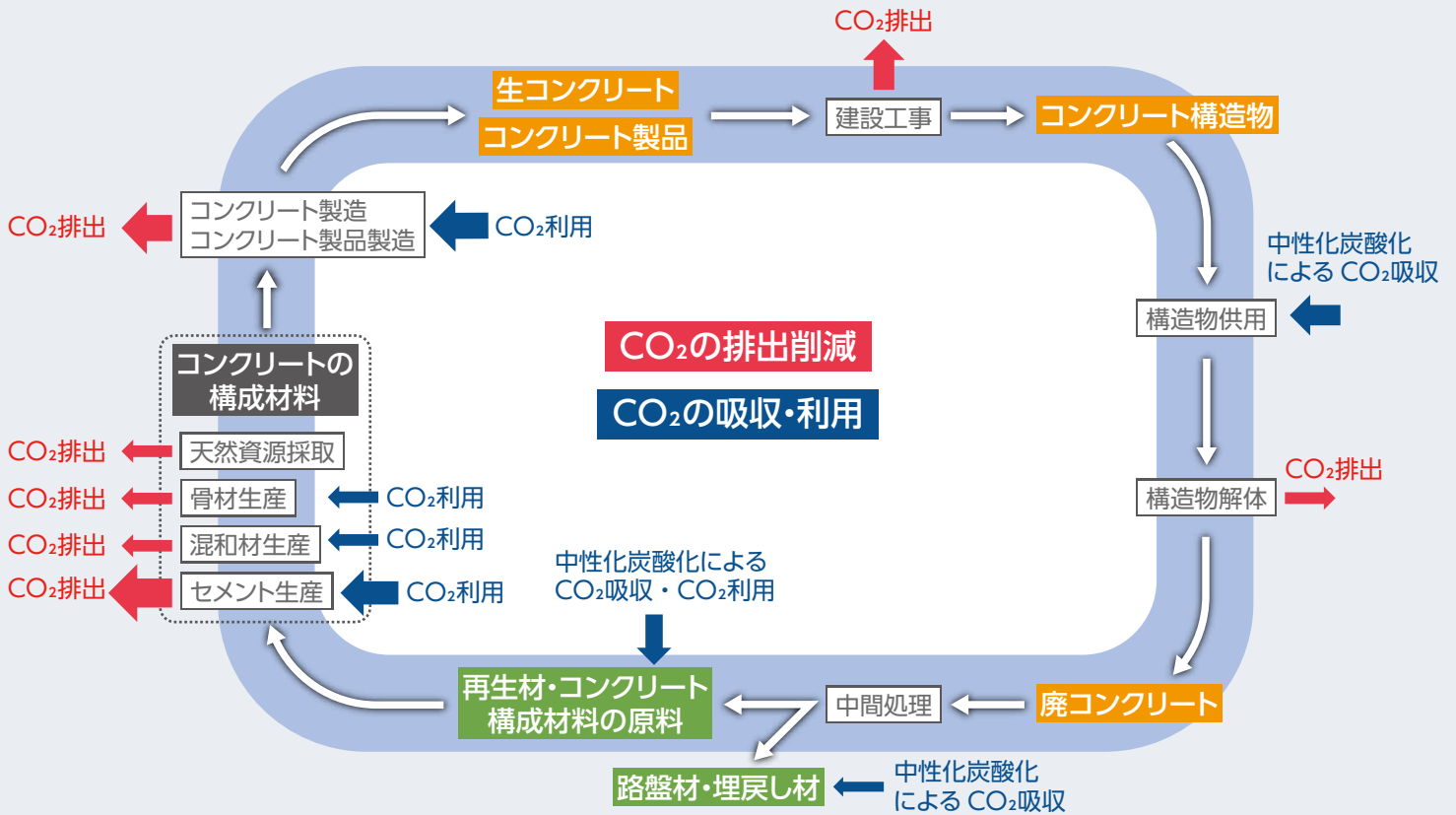


図4 セメント・コンクリートのライフサイクルの各段階におけるCO₂の排出・吸収

※文献 5, 6 をもとに作成

て、廃コンクリートまで含めた循環システムも重要です。コンクリートは大気中のCO₂と反応しCaCO₃としてCO₂を固定化します⁵⁾コラム。また、廃コンクリートや各種廃棄物から効果的にCO₂を固定化する技術開発も行われています。これをリサイクルしてセメント原料、骨材や混和材などに用いることでCO₂発生量を削減します⁵⁾⁶⁾(図4)。従来、図4のCO₂排出部分(赤矢印部)を削減する研究が主でした。しかし、

供用時の中性化の利用や廃棄物の利用まで含めて、CO₂の回収・有効利用を取り入れた対策(青矢印部)が求められています。

鉄道構造物への利用

鉄道構造物は、一度作ると長期間使用されるものであることから、実績を見極めながら導入を進めていく必要があります。

セメント量の削減については、フライアッシュセメントや高炉セメントの採用が進んでいます。例えば、フライアッシュセメントは中性化の懸念から限定的な使用に留まっていたことが、近年では北陸新幹線(金沢・敦賀間)において使用され、その適用範囲を広げています⁷⁾。また、軌道スラブやまくらぎでも、耐久性向上やCO₂削減の観点から高炉スラグの利用が図られています。

コラム「中性化は悪か?」

中性化とは、高pHのコンクリートが大気中のCO₂を吸収し、pHが低下する現象です。従来、中性化はコンクリートのアルカリ性を消失させることで鉄筋腐食を助長する本質的に悪いものとして捉えられていました。しかし、近年中性化は水分の少ないところで進行するため、鉄筋腐食を助長していない事例も多く、短絡的に悪いものとして捉えられなくなってきました。



図5 ジオポリマーの酸に対する抵抗性

一方、CO₂吸収によるカーボンネガティブコンクリートのような新しいタイプのコンクリートの鉄道への適用は、長期的耐久性の実績がないことや経済性の問題からこれからです。しかし、道路では、工場でコンクリートを打設し硬化させるため、高い品質管理が可能なプレキャスト製品から導入が進められており、高速道路の橋脚工事の埋設型枠⁸⁾に同様のコンクリートが使われました。同種のあるいはその他、種々のコンクリート構造物が存在する鉄道でも、今後適材適所での使用が図られていくものと考えられます。

鉄道総研における研究・開発事例

鉄道総研で研究開発しているジオポリマーはセメントを使用しないため、大きなCO₂削減効果が期待できます。また、酸に溶けづらい(図5)などの特徴を有しますが、材料コストが高く、養生温度の影響を受けやすいなどの課題もあります。そのため、常温養生のジオポリマーも開発されていますが、現状、蒸気養生によるプレキャスト工場製品の開発が主流です。

埋設型枠

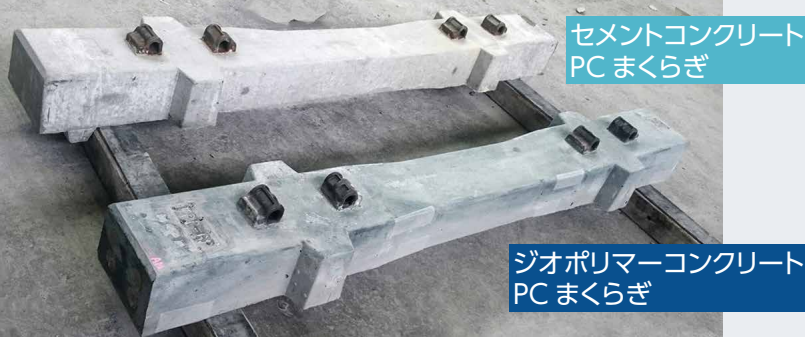
コンクリートを打設した後も取り外さず構造物の一部として使用される型枠のことです。

鉄道総研では、種々のコンクリート部材への適用を目的として、初めに小型ながら構造部材として比較的高強度が要求されるまくらぎを試作(図6(a))し、その強度などにおいて要求性能を満たすことを確認しました。図6(b)は酸性の漏水が発生しているトンネルに試験敷設したローカル線区用プレレスト(PC)ジオポリマーまくらぎの写真です⁸⁾。表2は、そのまくらぎコンクリートを1m³あたりの配合です。表2の各値に表1のCO₂原単位を掛けて足すと、まくらぎ1m³あたりのCO₂排出量となります。表2の配合例では71%の削減と試算されました。PCまくらぎの生産量はJRだけでも50万本/年程度となりますので⁹⁾、ジオポリマー化すると年間7000トン程度のCO₂削減となります。これは50万本の杉の木が1年間で吸収するCO₂量に相当します。今後、さらに、その他の部材、現場でコンクリートを打設するような部材への適用を検討していく予定ですが、まくらぎも含めて普及には材料コスト低減など多くの課題を残しています。

おわりに

コンクリートの脱炭素化技術は、種々の試みが行われており一つではありません。その中で鉄道総研では、ジオポリマーなど副産物を有効

(a) ローカル線区用ジオポリマー PCまくらぎ



(b) 酸性水が生じている営業線に試験敷設した様子



(c) まくらぎのコンクリート材料におけるCO₂削減効果

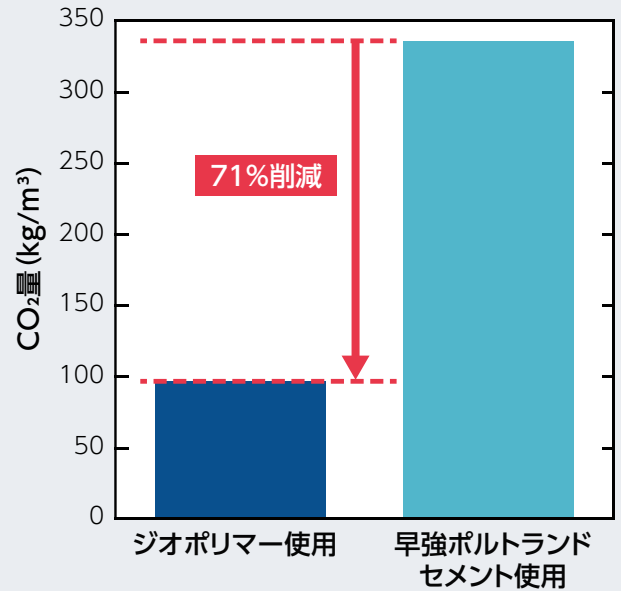


図6 ローカル線区用ジオポリマー PCまくらぎ (上写真) と酸性水が生じている営業線に試験敷設した様子 (下写真) およびまくらぎのコンクリート材料におけるCO₂削減効果 (右図)

表2 ジオポリマーと一般的なセメントまくらぎを1 m³作製するときの配合例 (kg/m³)

各種まくらぎ	早強セメント	フライアッシュ	高炉スラグ微粉末	シリカフューム	細骨材	粗骨材	水酸化ナトリウム	水	混和剤
ジオポリマー使用	---	289	234	25	736	848	84	165	9.65
早強セメント使用	431	---	---	---	741	998	---	157	3.52

※文献8 参照

利用した新しいコンクリートの開発を進めています。また、鉄道で、どのようなコンクリート部材の脱炭素化を進めたらよいのか、あるいは

どのような循環サイクルが効率的か、鉄道コンクリートの脱炭素化に貢献できる方法の研究を進めています。 **RRR**

文献

- 河合研至：カーボンニュートラルに向けた土木分野での取組みと方針，コンクリート工学，Vol.59，No.9，pp.737-741，2021
- 舟橋政司，白根勇二，荻野正貴，中村英佑：低炭素型のコンクリートの配合設計手法および硬化特性の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.232-237，2014
- 国土技術政策総合研究所：B-DASHプロジェクトNo.6 消化汚泥からのリン除去・回収技術導入ガイドライン(案)，国土技術政策総合研究所資料，No.805，pp.40-67，2014，<https://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0805.htm> (入手日：2023/9/7)
- 盛岡実，山本賢司，取違剛，横関康祐：工業原料を用いたγ-2CaO・SiO₂の製造とその二酸化炭素排出量の評価，Cement Science and Concrete Technology，pp.29-34，2010
- 野口貴文：コンクリートのライフサイクルを通じたカーボンニュートラル化，コンクリート工学，Vol.59，No.9，pp.730-738，2021
- 経済産業省：コンクリート・セメントのカーボンニュートラルに向けた国内外の動向等について(令和4年11月2日)，第11回 産業構造審議会グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ，https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/011_04_00.pdf (入手日：2023/9/7)
- 石川太郎，井上翔，加藤寛之：北陸新幹線におけるフライアッシュコンクリートの適用と試験施工，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.123-128，2018
- コンクリート技術シリーズNo.132，土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための研究小委員会(361委員会) 成果報告書，pp.230-233，土木学会，2022
- 箕浦慎太郎，渡辺勉，鈴木大輔，上半文昭：営業線PCまくらぎの摩耗性状とその耐荷力への影響に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp.1345-1350，2015