

# ジオポリマー法でコンクリートの環境負荷を低減する

上原 元樹

材料技術研究部  
(コンクリート材料研究室 主任研究員)

佐藤 隆恒

同  
(同 研究員)



うえはら もととき



さとう たかつね

## はじめに

現在、地球温暖化が社会問題化しています。その原因は、地表から放出される赤外線を温室効果ガスが吸収し、温室効果をもたらすためと言われています。温室効果ガスには種々のガスが知られていますが、その中で最も影響の大きなガスとして、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)があげられています。現在、日本では年間11億4500万トンものCO<sub>2</sub>が排出されていますが<sup>1)</sup>、コンクリートの材料となるポルトランドセメントの生産に起因したCO<sub>2</sub>排出量は、全排出量のおよそ4%<sup>2)</sup>と大きくその削減が求められています。

そこで、鉄道総研では、環境負荷低減の観点から、ポルトランドセメントを全く使わず、かつ産業副産物である石炭灰を使用した新しいコンクリートとしてジオポリマーコンクリートの研究・開発に取り組んでいます。以下に、その概要と、それを利用したまくらぎの試作例を紹介します。

## ポルトランドセメントコンクリートにおけるCO<sub>2</sub>の発生

ポルトランドセメントとは、土木や建築で使われる最も一般的なセメントで、普通にセメントと言うとこのポルトランドセメントを指します。これは、1824年にイギリスで発明されたもので、硬化後の色合いがイギリスのポルトランド島の岩石と似ていたことに由来しています。以下、

単にセメントと表記したときはポルトランドセメントを指すこととし、それから作られたコンクリートをセメントコンクリートと記します。

それでは、セメントコンクリートの生産ではなぜCO<sub>2</sub>が発生するのでしょうか。実はコンクリートそのものは、火災などで高温になるとか、酸をかけて溶けるとかいった特殊な状況にならない限り、むしろCO<sub>2</sub>を吸収する物質です。なぜ吸収するかというと、コンクリート中の水酸化カルシウム(Ca(OH)<sub>2</sub>)が空気中のCO<sub>2</sub>と反応して炭酸カルシウム(CaCO<sub>3</sub>)が出来る、いわゆる中性化という現象が起こっているからです。図1は中性化していないと赤く発色する薬剤をコンクリート断面に吹きかけた写真です。赤く発色していない部分は、CO<sub>2</sub>を吸収した部分です。ただし、皮肉なことに、コンクリートから見ると、この中性化という現象は、鉄筋腐食の要因となり好ましくない現象です。そもそも、強度の高い良質なコンクリートは中性化しづらく、コンクリート技術者もそのような中性化しづらいコンクリートを作るよう努力しています。

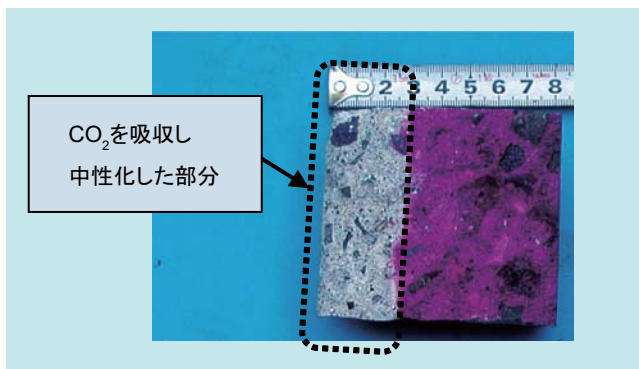


図1 セメントコンクリートの中性化によるCO<sub>2</sub>の吸収

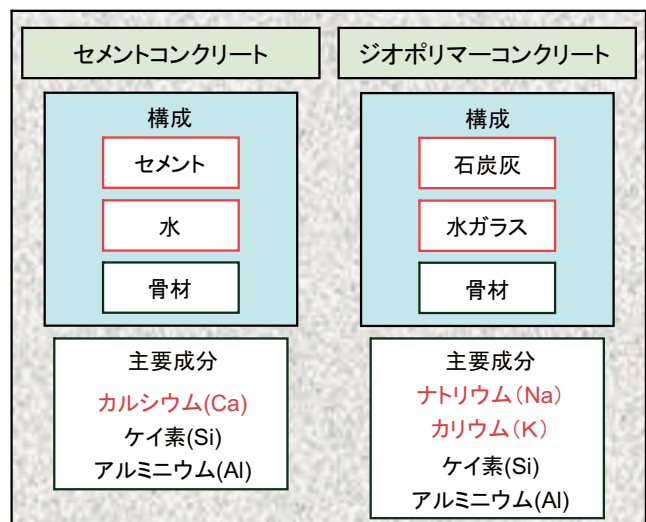


図2 セメントコンクリート・ジオポリマーコンクリートの構成

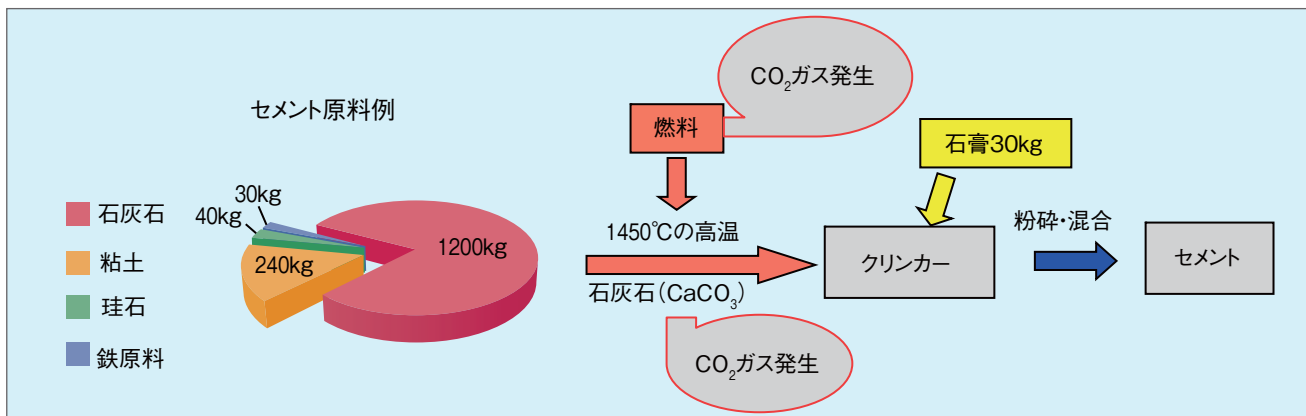


図3 セメント1トン作るための必要な原料と生産時におけるCO<sub>2</sub>ガス発生概念図

コンクリートの生産におけるCO<sub>2</sub>の発生理由は、コンクリートの主原料であるセメントを生産するときにCO<sub>2</sub>が発生するためです。一般的なセメントコンクリートは、セメント、水、骨材から出来ています(図2)。目的により配合は異なりますが、体積1m<sup>3</sup>(1m四方の立方体と同じ体積)あたり大体250~550kgのセメントを使います。セメント生産において、1トンのセメントを生産するのにおよそ770kgのCO<sub>2</sub>が発生します<sup>3)</sup>、1m四方のコンクリートを作るのに、原料となるセメント起源のCO<sub>2</sub>が、およそ190~420kg発生することとなります。

それでは、なぜ、セメントの生産の時にCO<sub>2</sub>が発生するのでしょうか。図3はセメント生産の流れを表した図です。セメントの原料の多くは石灰石(CaCO<sub>3</sub>)で、それをカルシウム(Ca)源としています。このCaCO<sub>3</sub>に珪石(ケイ素(Si)源)、粘土(Si源、アルミニウム(Al)源)などを混ぜて、およそ1450°Cの高温で焼成してセメントの原料であるクリンカーを作製します。このクリンカーと石膏(CaSO<sub>4</sub>・2H<sub>2</sub>O)を粉碎・混ぜ合わせたものがいわゆるセメントです。この中でCaCO<sub>3</sub>は酸化カルシウム(CaO)とCO<sub>2</sub>から出来ているため、高温で焼成する過程で分解しCO<sub>2</sub>が直接ガスとして発生します。また、1450°Cという高温で焼成するためのエネルギーとして化石燃料も多く使われ、ここでもCO<sub>2</sub>が発生します。もちろんセメントの化学成分と一致すれば、他の原料も使えるため、製鉄所からの副産物である高炉スラグなどCO<sub>2</sub>を含まない原料を組み合わせて、CO<sub>2</sub>発生量を減らす努力も行われております。

### ジオポリマーコンクリートの特徴

ジオポリマーコンクリートとは、セメントを使わないコンクリートの一つで、石炭火力発電所の副産物である石炭灰を水ガラス(ケイ酸アルカリ溶液)で固める比較的新しい技術です。見た目は、一般的なセメントコンクリートと

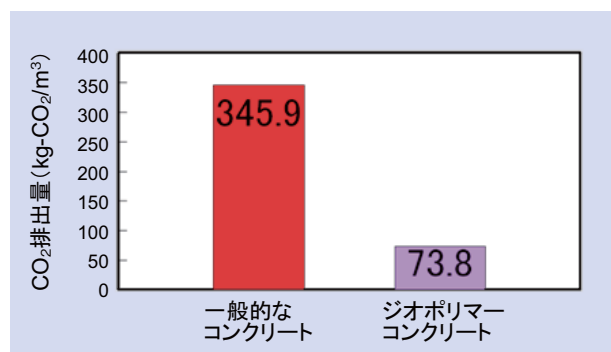


図4 コンクリートのCO<sub>2</sub>排出量

「鉄道総研の研究者が描く2030年の鉄道」, 交通新聞<sup>4)</sup>を参考に作成

あまり変わりませんが、その成分において、セメントコンクリートのセメントがジオポリマーコンクリートでは石炭灰、水が水ガラスという点が異なります(図2)。セメントを全く使わないため、その分CO<sub>2</sub>を削減することができます。例えばコンクリートまくらぎの配合では、およそ80%のCO<sub>2</sub>削減となり、JIS3号まくらぎでは一本あたりおよそ22kgのCO<sub>2</sub>削減量となると試算されています(図4)。

ジオポリマーコンクリートの作製方法は、一般的なセメントコンクリートと大差ありませんが、硬化機構が全く異なりますので性質は色々違ってきます。一般的なセメントコンクリートは、カルシウム(Ca)成分と水が反応して固まります。セメントが乾燥してコンクリートが硬化すると考えられている方が多いと思いますが、実は水との反応によって新たに微細なCa水和物が生じて、それらが絡まり合うような形で硬化します。それに対して、ジオポリマーコンクリートは、AlやSiが水ガラス中に溶け出し、それが重合して、岩石が出来るように固まる点で、いわゆる天然の鉱物と似ています。そこで、ジオポリマー(Geopolymer, ジオは地球を表し、ポリマーは重合体を表す)と名付けられました。

ジオポリマーコンクリートは、酸に強いことが特徴です。

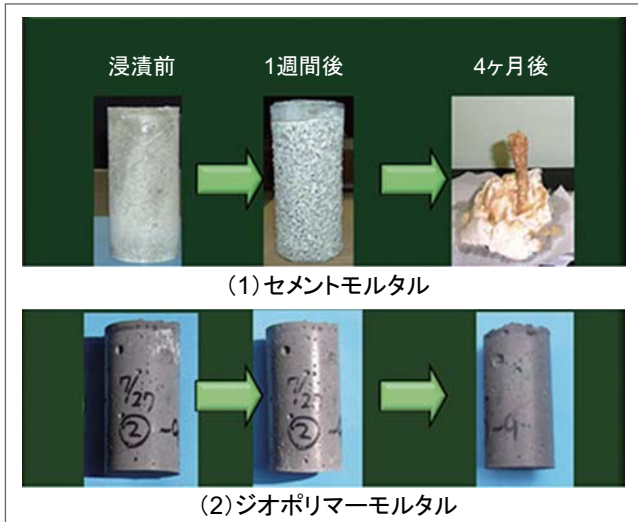


図5 硫酸浸せき試験結果

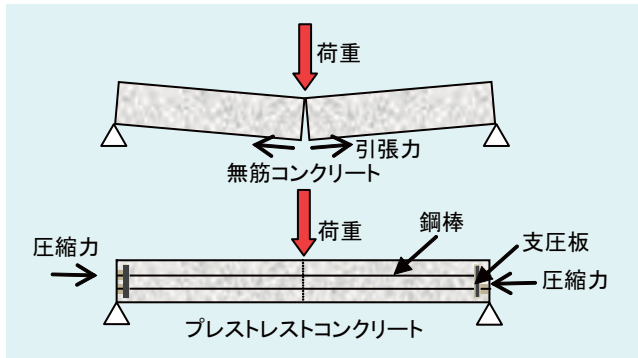


図6 ポストテンション式プレストレストコンクリートの概念図

図5は、セメントコンクリートとジオポリマーコンクリートを硫酸( $H_2SO_4$ )に浸せきして様子を見たものです。なお、試験ではコンクリートではなくモルタル(コンクリートから大きな骨材を抜いたもの)を用いています。セメントモルタルは $H_2SO_4$ に溶け、4ヶ月後の写真に認められる白色の石膏( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ )が多量に生じてポロボロに崩壊してしまっています。一方、ジオポリマーモルタルは、その外観に変化はなく、圧縮強度にも変化はありませんでした。このように化学的耐久性の高いジオポリマーコンクリートは、下水汚泥で酸性になるマンホールなどいろいろな応用が試みられています。鉄道総研では、ジオポリマーコンクリートの鉄道での応用例としてプレストレスト(PC)まくらぎを試作しましたので紹介します。

### プレストレスト(PC)まくらぎの試作

プレストレストコンクリート(PC)とは図6のように引っ張り力に弱いコンクリートに圧縮力を導入して、コンクリートを補強するものです。PCには二通りの方式があり、コンクリート中の鋼棒・鋼線をコンクリートと付着しない

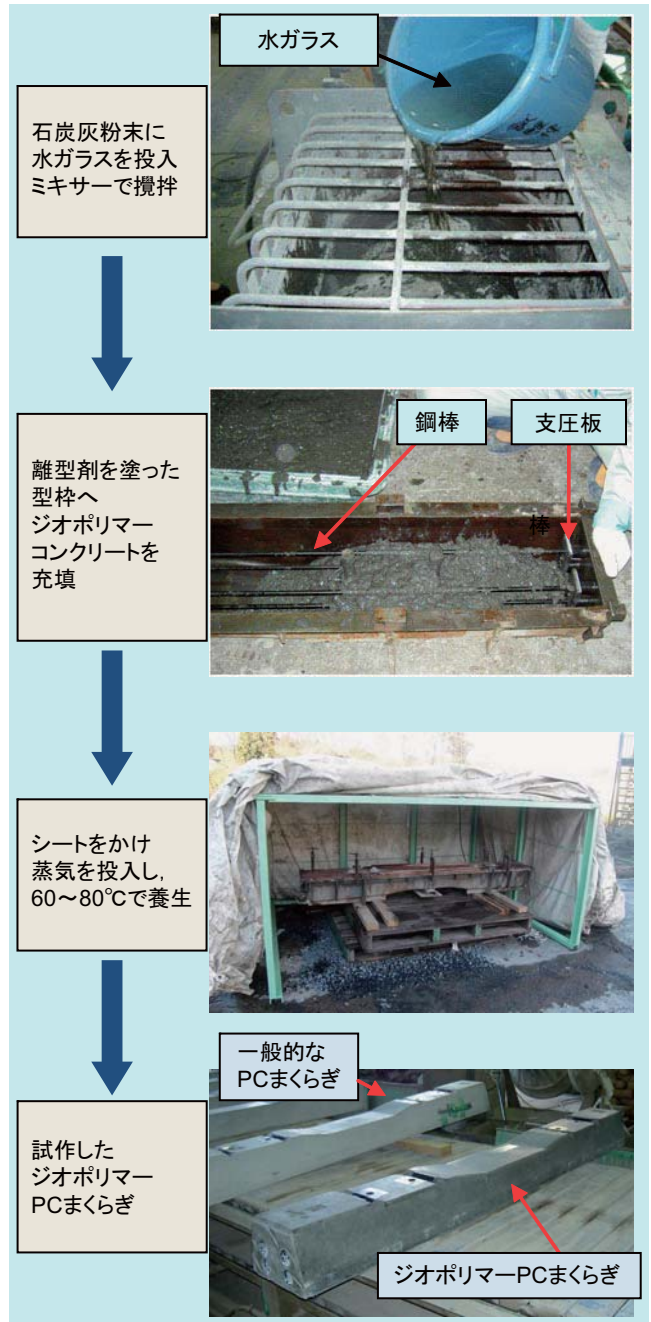


図7 ジオポリマーPCまくらぎの作製の様子

ように配置し(まくらぎの場合、鋼棒にコンクリートとの付着を防止するアンボンド材を塗ります)、硬化後それを引っ張って支圧板をボルトで固定し、部材両側の支圧板から圧縮力かけるのが、ポストテンション方式です(図6)。他に鋼棒・鋼線を引っ張った状態のままコンクリートを硬化させ、それらが元に戻ろうとする力とコンクリートとの付着力で圧縮力を導入するプレテンション方式もあります。

PCまくらぎは、高強度を求められるのにもかかわらず、型枠から早く取り出すことが要求されるため、蒸気で高温にして短時間に作製(蒸気養生)する必要があります。そ

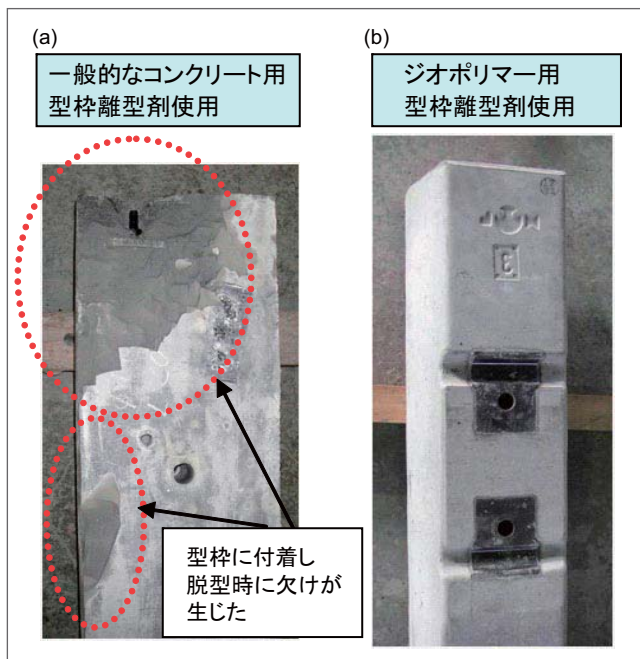


図8 ジオポリマーPCまくらぎの脱型の様子

の点では、コンクリート工場製品の中でも、その作製に高度な技術を要すると言えます。反対に、PCの中では、小さな部材であり、作りやすい部材とも言えます。そこで、このPCまくらぎにジオポリマー法を適用することにより、技術的に他の製品にも応用できるものと考え、まず、ジオポリマーPCまくらぎの実用化を目指して、ポストテンション方式によるJIS3号相当のジオポリマーPCまくらぎを試作しました。

図7はジオポリマーPCまくらぎ作製の様子です。作製過程は、セメントコンクリートと大きく異なることはありませんが、多少異なるところは、水ガラスの粘性のために、硬化前の性状が水飴状となり、それをミキサーで攪拌したり、型枠に充填したりするのが少し大変なところでした。その代わり流動性は良いため、型枠に振動をかけると、細かいところまで良く充填します。図7で試作したジオポリマーPCまくらぎは、その強度においてJIS E 1202「ポストテンションPCまくらぎ」に規定された要求性能を満たすことが確かめられています。

現在、鉄道総研では、このジオポリマーPCまくらぎの実用化や、その他コンクリート工場製品への適用を考慮研究開発を進めています。しかし、100年以上の歴史を持ち多くの人が研究しているセメントコンクリートと比べると、いろいろと予想できない問題点があるのも事実です。次にジオポリマーコンクリートにおける、それらの課題と解決した事例を記します。

## ジオポリマーコンクリートの課題

現代のコンクリートは図2で示した原料以外に、少量（セメントの1%程度）の添加で、大きな効果を発揮する混和剤（減水剤、AE剤、AE減水剤、凝結・硬化調整剤などの各種薬剤）が加えられています。現代のコンクリートは、これら混和剤によりその凝結までの時間や流動性などの施工性が細かにコントロールできるようになっています。

一方、ジオポリマーコンクリートは、まだ開発が始まったばかりで、ジオポリマー用として開発された混和剤は現在のところありません。ジオポリマーコンクリートは、配合によっては凝結が速く扱いにくいいため、凝結時間をコントロールする混和剤の開発が求められています。

図8は混和剤ではありませんが、一般のコンクリート用の「型枠離型剤」が使えなかった事例です。一般の型枠離型剤を使用したときは、コンクリートが鋼製型枠に付着してしまい、作製したまくらぎが割れてしまいました（図8(a)）。そこで、融点の高いワックス系離型剤を使い、この問題を解決しています（図8(b)）。このように、ジオポリマーコンクリートの普及のためには、セメントコンクリートでは考えられなかった課題もあるために、色々な分野の知恵を集めて対処しながら研究を進めています。

## おわりに

まくらぎなどは製品単体でのCO<sub>2</sub>削減量はそれほど大きなものではありません。仮に年間10万本JIS3号まくらぎを敷設したとしても、その削減量は2000トン程度です。「ちりも積もれば山となる」という言葉の通り、環境負荷の低減には、いろいろなコンクリート製品で広く使われることが必要です。現在、ジオポリマーコンクリートは、セメントコンクリートより高コストです。そこで、当面は価格に占める材料コストの割合が小さな工場製品への利用を検討していますが、高価な水ガラスを減らしても高い強度が出るように、石炭灰に加えて高炉スラグを利用するなど、広く実用化を目指して低コスト化への研究も進めています。

## RRR

### 文献

- 1) 「2009年度（平成21年度）の温室効果ガス排出量（確定値）」、環境省
- 2) 「エネルギー消費、CO<sub>2</sub>排出の状況」（社）セメント協会ホームページ
- 3) 「鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用（平成23年版）」、鉄鋼スラグ協会
- 4) 「鉄道総研の研究者が描く2030年の鉄道」p162、交通新聞社