

## 平成21年度「重点研究課題」調査研究報告書

研究課題名：環境調和型コンクリート材料学の創造に関する研究

研究代表者：濱田 秀則

(推薦：コンクリート委員会)

### 研究の背景

近年、地球環境に関する問題が深刻である。

人類にとって、地球温暖化への対応はもはや避けて通ることが許されず、温暖化抑制のために、二酸化炭素の排出を厳しく抑制しなくてはならない。建設産業、コンクリート産業に対しても二酸化炭素排出抑制を初めとして、環境に対する十分な配慮が強く求められている。一方で、人間社会が健全かつ持続的な発展を続けるためには、社会基盤が適切に整備され、維持される必要がある。そのためにも、社会の一部に存在する「公共事業＝環境破壊、環境負荷増大」という、ある意味で偏ったイメージを払拭することも大切なことである。

土木学会地球温暖化対策特別委員会が示す提言においても、低炭素社会形成にむけた戦略として土木材料由来の二酸化炭素排出削減を謳っており、セメントや鉄などの材料についてのリサイクル材料の利用、木材などの低炭素素材への転換など、土木材料のライフサイクルにおける温室効果ガスの排出を明らかにし、その削減を実現する、と明記されている。土木事業にかかる材料供給者および材料消費者は、この問題に対する最も本質的な対応として、環境調和型材料技術の高度化と材料供給システムの確立を至急進める必要がある。

### 研究の主眼

本研究においては、「環境調和」の意味を突き詰め、従来のコンクリート工学の中では定義されていない「環境調和型コンクリート」を明確に定義し、21世紀の社会に対応したコンクリート工学を構成することを目的としている。環境には二つの側面があり、まず材料としての環境負荷低減、例えば、廃棄物・副産物の活用があり、さらには構造物を造りあげたことによる環境変化という側面もある。従来から言われている環境負荷低減コンクリートは前者に対応するものであり、環境対応型コンクリートは後者に対応するものである。環境調和型コンクリートとは、環境負荷低減コンクリートに近いものであるが、複数の効果を総合的に評価する意味を込めている。例えば、セメントの製造においては大量の二酸化炭素を排出するが、製造過程において大量の廃棄物を燃料として再利用している。このように相反する効果を最適なレベルで調和させたコンクリートが、環境調和型コンクリートと定義される。

本研究を推進することにより、建設産業・コンクリート産業を“持続可能な産業”として定着させ、従来の「コンクリート工学・コンクリート材料学」の学問体系を拡大させるとともに、必要とされる技術者の教育育成方法についても提案する。

## コンクリート

説明するまでもなく、コンクリートとはセメント、水、細骨材、粗骨材および必要に応じて加える混和材料を構成材料とし、これらを練混ぜその他の方法によって混合したもの、または硬化させたもの、である。英語の Concrete という字は、相共に結合して一体になるという意味を有する。また、良いコンクリートとは、最も経済的に使用の目的を達する事が出来るコンクリートが、最善のコンクリートであるとされている。この“良い”コンクリートの定義は少々古く、最近の環境問題を鑑みた場合、良いコンクリートとは、最も経済的に使用の目的を達する事が出来、かつ環境と最も調和したコンクリートを、良いコンクリートであると定義できる。

現在の世界においては、人口一人あたり 1m<sup>3</sup> のコンクリートを毎年生産している。コンクリートを生産する立場、使用する立場、利用する各々の立場から、環境に十分な配慮を払わなくてはならない理由はここにある。なお、環境にはいくつかのレベルがあるが、地球環境、地域環境、作業環境といったレベルがコンクリートを取り巻く環境として考えられる。

### 環境調和型コンクリートとは

以下に示す日本コンクリート工学協会の委員会報告書によると、環境対応型コンクリートとは、コンクリートの基礎的な性能を保持した上で、コンクリートの利用主体における特定の環境を時間経過とともに、改善、向上させるようにあらかじめ設計されたコンクリート、と定義されている。一方、環境負荷低減コンクリートとは、従来型のコンクリートに比べて、環境に対する負荷を低減させているコンクリート、定義される。そのイメージを下表のように説明している。

	内部環境		外部環境	
	環境負荷低減性能の向上	環境改善性能の向上	環境負荷低減性能の向上	環境改善性能の向上
従来型コンクリート	---	---	---	---
環境負荷低減型コンクリート		---		---
環境対応型コンクリート	---		---	

直接的目的                      間接的目的                      --- その他

(社団法人日本コンクリート工学協会 環境対応型コンクリートの環境影響評価手法の構築研究委員会報告書  
(委員長：国枝稔)平成 19 年 7 月による)

環境調和型コンクリートとは、環境負荷低減コンクリートに近いものであるが、複数の効果を総合的に評価する意味を込めている。例えば、セメントの製造においては大量の二酸化炭素を排出するが、製造過程において大量の廃棄物を燃料として再利用している。セメント生産におけるエネルギーの 20～30%が、廃タイヤ、廃油、廃プラスチック、および都市ごみの利用によってまかなわれている。二酸化炭素の排出を極力低減させることのみが達成されればよいのならば、セメント生産を停止

することが至上命題となるが、主要な静脈産業として他では処理できない廃棄物を大量に処分していることを考慮すれば、適正な生産量というものがあると考えられるのである。

本研究で用いている「調和」という言葉はまさにこのことを意味しており、相反する効果を最適なレベルで調和させたコンクリートを、環境調和型コンクリートと定義する。

### 環境調和型コンクリートを構成する材料の分類

現在でも、副産物の有効利用の観点から、天然骨材の代替材料として、再生骨材、高炉スラグ骨材、フェロニッケルスラグ骨材、石炭灰、下水汚泥、ガラスカレットなど、セメント代替材料として、フライアッシュ、高炉スラグ、など多くの材料が研究開発されている。

本研究においては、数ある材料をそれぞれの開発レベルに応じて、以下の 5 項目に分類することとした。

1) JIS 5308: 2009 (レディーミクストコンクリート) にその使用が認められているものを活用するコンクリート

例えば、スラッジコンクリート、高炉スラグ、銅スラグ、フェロニッケルスラグ、電気炉酸化スラグ、再生骨材 H、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフューム、普通エコセメント。

2) JIS A 5308: 2009 (レディーミクストコンクリート) には、その使用が認められていないが、JIS には規格化されている材料を活用するコンクリート

例えば、速硬エコセメント、下水溶融汚泥スラグ、再生骨材 M、再生骨材 L。

3) JIS に規格化された範囲の外にある品質のものを活用するコンクリート

例えば、規格外フライアッシュ、シラス骨材、微粒分の多い砕砂。

4) JIS に規格されていないが、設計・施工指針等のある材料を活用するコンクリート

例えば、鉄鋼スラグ水和固化体、硫黄固化体。

5) 設計・施工指針等もない材料を活用するコンクリート

例えば、発泡スチロール廃材、FRP 廃材、牡蠣やホタテ貝殻、廃瓦。

### 環境調和型コンクリートの定量的な定義

環境調和型コンクリートを明確に定義付けるためには、何らかの定量的な指標が必要であると考えられる。すなわち、ある指標を用いて、その指標の値がある数値より上(あるいは下)であれば、その材料を用いたコンクリートは「環境調和型コンクリート」とみなせる、という感覚である。この指標の方向性も種々のものが考えられるが、本研究の議論では、まず、二酸化炭素排出量、再資源化率、地域性(地産地消)が挙げられた。

#### 二酸化炭素排出量、再資源化率の位置づけ

環境調和型コンクリートを定義する際に指標となる「二酸化炭素排出量」および「再資源化率」の位置づけを明確にし、新たな指標の可能性について検討した。環境配慮の型は下記の 4 種類に分類し

て考察した。

(なお、以下の4分類は、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(2008年9月)を参照した。)

1) 省資源型 :

再生材料の使用や使用後にリサイクルに供することが可能な資材・材料を使用すること、あるいは材料を高強度化することで部材断面を低減することなど、天然資源の使用量を削減する環境配慮。

2) 省エネルギー型 :

資材・材料の製造・移送・運搬、建築物の施工、建築物の供用、解体工事、廃棄物の処理等に要するエネルギーを削減するような材料、機器およびシステムを用いる場合の環境配慮。

3) 環境負荷物質低減型 :

地球環境、地域環境、作業環境など、様々な空間規模の環境に対して負荷要因となる地球温暖化、オゾン層破壊、酸性雨、生態系破壊、近隣環境公害(大気、土壌、水質の汚染など)、ヒートアイランド現象、室内衛生環境汚染などを生じさせる有害な物質(例えば、CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>など)を低減する環境配慮。

4) 長寿命型 :

建築物およびその構成材の耐久性の向上に寄与し、鉄筋コンクリート建造物の耐用年数を増大させることに貢献する環境配慮。

本研究で考えている環境調和型コンクリートでは、4)長寿命型に該当する材料を対象外とするため、コンクリート材料の選定時に環境に配慮する場合、1)~3)に該当する材料として以下のように例示できる。

1) 省資源型 :

代替骨材の利用、天然骨材の再利用、産業副産物を原料とする材料。

2) 省エネルギー型 :

産業副産物を原料とする材料、地産地消型材料。

3) 環境負荷物質低減型 :

通常のセメントコンクリート材料(CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>を取り込むことができるため)

上記の中で、「CO<sub>2</sub>排出量」を指標として直招的に表せるタイプは2)、「再資源化率」を指標として表せるタイプは1)と考えられる。

二酸化炭素排出量、再資源化率以外に提案しうる指標

1) 燃料・原料を含めた廃棄物割合

前項で示した、1)省資源型の定義の拡張(天然資源燃料の使用を削減する環境配慮)および3)とも関連するが、「燃料を含めた廃棄物割合」を指標として提案し、ある数値を超えたものを「環境調和型コンクリート」として定義するという考え方。その根拠は、現在では、二酸化炭素を指標とした考え方が広く一般化しており、二酸化炭素排出量のみで判断されてしまう傾向があるため。先に示したように、セメント工場が廃棄物を燃料として受け入れ、循環型社会において不可欠な存在であるにもかかわらず、CO<sub>2</sub>基準ではこのような社会貢献は評価されにくい、という事例があるため。

## 2) 廃棄物自体の品質安定性を考慮した再資源化率

1) 省資源型の定義の拡張になるが、省エネルギーあるいは低環境負荷型の材料を製造するにあたっての技術的水準に着目し、廃棄物自体の品質安定性を材料係数として乗じることにより、再資源化率を再定義するという考え方。根拠としては、環境配慮型材料の再資源化技術あるいは利用推進においては、品質向上のための技術水準が指標として含まれていることが重要であると考えられるため。

### フードマイレージに相当するマテリアルマイレージの考え方

一般に、フードマイレージという考え方がある。これは、食料の輸送量(トン)に、食料の生産地から消費地まで運ばれる距離(km)をかけたものとして定義され、輸送に伴う二酸化炭素排出量を推計でき、環境への負荷を表す指標とするものである。この考え方を、コンクリート材料にも適用することで、個々の材料の地産地消のレベルを示す指標とする可能性を考えた。

素朴な議論であるが、「遠くから再生材料を調達する場合」と「近くで普通の材料を調達する場合」はどちらが地球に優しいのであろうか、すなわち環境に調和していると言えるのであろうか。以下のような指標もあり得る。

「地球への優しさ」= 「(材料の環境単価) × (運搬手段の環境単価) × (運搬距離)」

マテリアルマイレージを如何に定義すべきか、さらに議論を進めていくこととした。

### 主要3項目の評価方法(試案)の提案

本研究においては、「二酸化炭素排出量」、「再資源化率」、「地域性(地産地消)」を個別の評価指標として選び、様々な材料について、この3項目の評価を行った。そして、異なる評価指標の総合評価をどのように行えばよいか、すなわち最適な調和とは何か、について検討を行った。その一つの答えとして、(環境調和指標) = f((温室効果に関わる指標)(廃棄物に関わる指標)(地産地消に関わる指標))を提案するに至った。

環境調和型コンクリートを以下に示すようにシンプルに定義する。

「地域で産出する材料を最大限に有効利用し、地球環境、地域環境に最大限に配慮した結果、最小の負荷で生産された材料で構成するコンクリート」

なお、地球環境を評価する指標として、温室効果ガス、大気排出物質の排出量、地域環境を評価する指標として、水質汚濁物質、土壌汚染物質、廃棄物の排出量、などが考えられる。また、場合によっては、社会環境を評価する必要がある。例えば、快適さ、便利さ、親しみやすさ、などが評価項目となる。

環境調和型コンクリートの定量的評価指標として、計算自体は容易に行えるものがよい、との判断から次式を一例として提案した。

$$I = I_G + I_W + I_L$$

I: 環境調和指標

$I_G$  : 温室効果に関わる指標

= (その材料使用に伴う CO2 排出量削減百分率) / (25%)

$I_W$  : 廃棄物に関わる指標

= (リサイクル資源使用量) / (バージン資源使用量 + リサイクル資源使用量 + 発生廃棄物量)

$I_L$  : 地産地消に関わる指標

= 1 - (その材料の生産地・出荷地間の距離 (km) - 50km) / 1000km

(ただし、距離が 50km 未満のとき  $I_L=1.0$ 、1050km 以上のとき  $I_L=0$ )

評価式は、場合によっては、次式が適しているかもしれない。

$$I = (I_G + I_W) \times I_L$$

評価式自体については、さらに検討を加えていく予定である。

## 今後の計画

1年間の研究では十分に満足のできる結論を得るまでには至っていない。この1年間の成果を持って、平成22年度全国大会の研究討論会を開催することにしている。テーマは、1)環境調和型コンクリートの定義は正しいか、2)環境調和型コンクリートとして成立するための定量的指標は正しいか、3)環境調和型コンクリートを取り込んだコンクリート工学・コンクリート材料学の体系はいかにあるべきか、4)環境調和型コンクリートを製造するためのシステムはいかにあるべきか、5)環境調和を考慮できる技術者・技能者の教育システムはいかにあるべきか、を考えている。

研究討論会での議論の成果、新しく出された意見を考慮した上で、再度、研究成果を取りまとめ、皆様に報告する予定である。

## 謝辞

本研究を遂行するために、コンクリート委員会に種委員会として「環境調和型コンクリート材料学の創造に関する研究委員会」を設置し、議論を重ねてきた。委員会の設置をお認めいただきました宮川豊章コンクリート委員会委員長にお礼申し上げます。また、委員会に参加し、熱心な議論をしていただきました以下の皆様に感謝申し上げます。以下の皆様には、研究討論会にもご参加いただき、さらなる議論を行っていただく予定です。

宮里心一氏(金沢工業大学)、綾野克紀氏(岡山大学)、河合研至氏(広島大学)、久田真氏(東北大学)、佐川康貴氏(九州大学)、斉藤豪氏(東京工業大学)、山本貴士氏(京都大学)、加藤絵万氏(港湾空港技術研究所)、市川牧彦氏(太平洋セメント)、堀井秀之氏(新日本石油)、市川孝一氏(JFEスチール)、松永久宏氏(JFEスチール)、山本武志氏(電力中央研究所)、取違剛氏(鹿島建設)、石田哲也氏(東京大学)、国枝稔氏(名古屋大学)、山口明伸氏(鹿児島大学)、鈴木康範氏(住友大

阪セメント)、中井将博氏(ピーエス三菱)、杉山隆文氏(北海道大学)、重石光弘氏(熊本大学)、渡辺博志氏(土木研究所)、肴倉宏史氏(国立環境研究所)、檀康弘氏(新日鐵高炉セメント)、大島正記氏(BASFポゾリス)、田口茂久氏(福岡県生コンクリート工業組合)、羽瀨貴士氏(東亜建設工業)。