

第7章 建築構造用コンクリートに関する需給環境の将来予測

7.1 概説

7.2 建築構造用コンクリートの環境シミュレーション

7.3 建築構造用コンクリートの LCCO₂削減の方策

7.4 第7章のまとめ

7.1 概説

建築物というものは、非構築な状態にあっても、その存在意義を見出すことができるという考え方[1]があるように、建築物の存在意義は視点を変えることで多種多様に変化するものと考えられる。そして、建築物が様々な材料の複合体として生み出された時点で、既にその外観からは読みとることが困難な物質性能および形而上的性能に関連する多くの潜在的問題を抱える物体として認識することも可能であろう。そのように考えられる理由のひとつとしては、建築物が最終的に竣工するまでの過程において、実際は、長い年月をかけて育まれた自然環境を破壊しながら、膨大な資本と労力を投入した上で形成される仕組みの上に成り立っていることが一般的に理解されるためである。これは換言すれば、建築物自身は竣工直後の状態からは想定することが困難な環境負荷因子を予め内在していると捉えることも可能であり、特に建築物およびその構成要素における物質性能を引き出すために実行された形而上性能である生産行為の中に、想定し難い環境負荷因子が数多く存在すると考えられるのである。しかしながら、現実的には生産行為に関連する環境負荷因子は物質の姿として認識することが非常に困難であるため、未然防止的な思考に基づいて物質に備わっている生産行為による環境負荷因子を情報の形で読みとりその存在を明確にすることが必要と考えられる。具体的には、「コンクリート塊から低品質再生骨材を製造するリサイクル行為には、将来的に最終処分場枯渇問題を導く環境負荷因子が備わっている。」という具合である。なおこのように加工製品に対しては、その形態を獲得するために蓄積された生産行為に関する情報というものが消滅することなく存在しているという情報保存の法則[2]という概念も示されている。

既存コンクリート構造物は、順工程生産システムの合理化を重視して企画・計画および設計・施工が実施されてきたため、構造物を生産する工程において生産行為自身が自然環境を荒廃させる行為であることが認識されたとしても、その問題を解消する仕組みを有した生産行為が優先的に実施されることは生産の本質的な目的から外れる行為となるためにあり得ない事象であったと思われる。現在、このような状況が大きく変化する方向に世の中が動いていることは明らかであり、企画・計画の段階より自然環境を荒廃させる可能性のある環境側面に留意した上で経済的に成立する新たな生産システムを構築し始めたといえる。2003 年始めに示された国内の公表事業における業者選定方法の総合評価入札方式に関して、生産行為における環境負荷を始め、材料選定段階、再生処理段階における環境側面を定量的に評価することを入札方式に組み込むことなどはその良い事例であると思われる。また世界的な動向としては、IPCC の第三次報告書[3]において、世界全域における地球温暖化物質の主要な発生源に、セメント製造業における生産行為を具体的に指摘し、それを受けて 2002 年に示された WBCSD の持続可能な開発の行動計画に関する報告書[4]では、セメント製造における二酸化炭素排出量削減に向けての具体的な対応策を示し、その実施を世界各国の主要なセメント製造会社に対し要請している。

セメント製造における二酸化炭素排出量を低減可能とする方法の BAT は、どのような手法もしくはどのような手法の組み合わせであろうか。具体的には、第 1 に既存構造物のリニューアル・リユースを促進して寿命を伸ばすことにより、新規建築物の生産量を徐々に低下させる手法が挙げられる。第 2 には一度脱炭酸化して得られたセメント原料を効率よく回収し、再びセメント原料として使用する手法などが挙げられる。これらが現状の技術で実行可能な方策として考えられよう。

以上より、本章では前述した第 2 の手法を実行可能にするセメント回収型－完全リサイクルコンク

リートおよび骨材回収型－完全リサイクルコンクリートに関して、その製造に関わる環境シミュレーションを行うことで、天然骨材資源使用量、コンクリート製造量、最終処分コンクリート発生量、セメント製造起源二酸化炭素発生量などの環境側面の変化を分析し、環境に配慮したコンクリートにおける環境改善可能性を検討することを目的とする。なお、比較対象として、順工程生産システムのもとで生産された既存コンクリート構造物におけるダウンサイクルによる更新手法により、コンクリートが低品質骨材や再生砕石として再び原料化する場合およびレベルサイクルの更新手法により、コンクリート中の骨材が構造用コンクリートの材料として再利用される場合を組み込み、将来の人口推計に基づく単位人口あたりのコンクリート基礎生産量の低下を考慮した環境シミュレーションを実行する。

続いて、環境シミュレーションの結果を考慮した上で、構造用コンクリートの LCCO₂ 削減への方策として、地球環境に配慮したコンクリート構造物を生産する BAT を示すと同時に、1997 年の地球温暖化防止京都会議で締結された京都議定書に示される温暖化ガス排出量削減の手法として位置づけられる京都メカニズムに関して、その基本的な仕組みである排出権取引、共同実施(JI)、グリーン開発メカニズム(CDM)等の性質を考慮した上で建設活動における LCCO₂ の削減手法について考察を行う。そして、完全リサイクルコンクリートを中心とした環境負荷低減が積極的に考慮された構造用コンクリートにより、地球温暖化防止に貢献できることを最後に考察する。

7.2 建築構造用コンクリートの環境シミュレーション

7.2.1 背景と目的

地球環境問題に対する意識がほぼ皆無であったと考えられる高度成長期において、コンクリートは構造物の主要な構成材料として一般的に使用される状況を実現したといえる。その原因として、当時は順工程生産システムに基づく建築構造用コンクリートというものは、地球環境に与える影響を考慮しなくても、構造物の構造安全性を確保するための物質的性能を有していれば、その価値が認められたことが挙げられる。このような状況は、現在では正しい仕組みとして理解を得ることは困難と思われる。

将来の日本において、逆工程付加型－順工程生産システムおよび順逆工程生産システムに基づく生産体系が建設業における生産システムの主流をなすことは恐らく間違いないと思われるが、その状況における建築構造用コンクリートに求められる本質的価値を再考すると、構造物の構造安全性を確保するための物質的性質に加え、コンクリートが廃棄されず再利用され、将来的に環境負荷が小さくなる物質性能を有していることが必要になる。そして、このような性能を充足するコンクリートのひとつに完全リサイクルコンクリートが挙げられるのであるが、その具体的な効果を次に示す全4種類のコンクリートを基にした環境シミュレーションにより示す。

全4種類のコンクリートとは、(a)順工程生産システムに基づき製造され、簡便な逆工程でダウンサイクルされるコンクリート、(b)順工程生産システムに基づき製造され、高度な逆工程でレベルサイクルされるコンクリート、(c)順逆工程生産システムに基づき製造され、セメント原料として全量がレベルサイクルされる完全リサイクルコンクリートそして、(d)順逆工程生産システムに基づき製造され、骨材原料として全量がレベルサイクルされる完全リサイクルコンクリートとする。これらの建築構造用コンクリートについて、経年変化を考慮した環境シミュレーションを行う。なお比較用となる(a)のコンクリートは、主に路盤材用碎石として再利用されるものであるが、需用が見込まれる期間は循環性能が低いシリーズとして位置づけた上で積極的に活用する方向で考えるものとする。

環境シミュレーションの具体的な方法は、始めに全国および首都圏におけるコンクリートの基本情報に関する調査を行い、得られる強度特性などのデータを標本となる各種コンクリートの性質に反映させた上で、環境シミュレーションの設定条件を定める。その上で、4種類の建築構造用コンクリートの物質特性および需給特性に関する条件設定をした上で、2000年を起点として2250年に至るまでの経年変化を考慮したシミュレーションを実行する。これにより、各種コンクリートにおける地球環境に与える環境側面の特徴が示され、構造用コンクリートとしての新しい価値を明確にすることが可能になる。

7.2.2 建築構造用コンクリートの基本情報の整理

表 7.2.1 に建築構造用コンクリートの材料試験データについて、図 7.2.1 に建築構造用コンクリートの呼び強度分布と管理材齢強度について示す。

建築構造用コンクリートの材料試験データは、平成 12 年度の全国圏および首都圏における建設現場で使用された生コンに関する水セメント比、呼び強度および管理材齢圧縮強度の調査データを整理したものである。シリーズⅠの全国圏データは、国土交通省・経済産業省共管の公益法人である財団法人日本建築総合試験所により提出された平成 12 年度版のコンクリート工事用材料試験データ[4]であり、シリ

ーズⅡの首都圏データは、東京地区生コンクリート協同組合における平成 12 年度版のコンクリート工事用材料試験データの聞き取り調査結果である。これらと呼び強度、耐久性グレード別の出荷量割合、呼び強度比、平均強度および平均水セメント比の項目としてデータを再構成した。

全国圏におけるシリーズⅠのデータに関しては、構造用コンクリートの平均水セメント比は 58.1%程度であり、標準的な管理材齢における圧縮強度は 34.1N/mm²となっている。これに対し、首都圏であるシリーズⅡのデータに関しては、構造用コンクリートの平均水セメント比は 53.5%程度であり、標準的な管理材齢における圧縮強度は 38.5N/mm²となっており、いくらか高めのコンクリート強度を示している。首都圏の大型構造物の施工に伴うコンクリートの高強度化などの要因が影響していると考えられる。

地球環境時代における建築構造用コンクリートとしての価値は、資源循環性を確保した上で構造安全性を確保することであると考えられるが、それは構造物の立て替え更新が早く、新規構造物の需用も比較的多い都市圏を中心に強く要求される価値であると考えられる。また、日本建築学会が 1997 年に地球温暖化防止京都会議の開催に際しての提言[6]や、地球環境憲章における構造物の耐久性を高め、長寿命化を推進する提言[7]に示される内容も考慮すると、環境シミュレーションは、都市部における構造用コンクリートのあり方を想定したものとするのが重要と思われる。

表 7.2.1 建築構造用コンクリートの材料試験データ

項目		内容							
使用データ		シリーズⅠ（平成 12 年度－全国圏コンクリート工事用材料試験データ[4]） シリーズⅡ（平成 12 年度－首都圏コンクリート工事用材料試験データ）							
データ概要		データはシリーズⅠ(全国圏)とシリーズⅡ(首都圏)に区別し、生コンの呼び強度から推定されるコンクリートの平均水セメント比を各々推定する。 建築工事作業所では構造体コンクリートの強度管理を公的機関または第 3 機関で実施することが義務づけられている場合が多い。従って、シリーズⅠでは、日本建築総合試験所が公表した平成 12 年度の強度管理実績より、呼び強度と強度管理材齢における圧縮強度データを抽出し、セメント水比式より平均水セメント比を推定する。なお使用した強度管理実績データは、国内各地から集計されている。 シリーズⅡに関しては、東京地区生コンクリート協同組合における平成 12 年度の生コン出荷状況データを基にしており、シリーズⅠにおける試験実績より導出された呼び強度比を用いて平均圧縮強度を算定し、セメント水比式より平均水セメント比を推定した。なお東京地区生コン協同組合は、東京都 23 区中 17 区を納入範囲とし、組合会社 55 社 65 工場よりなり、500 万 m ³ /年程度の出荷量がある。 耐久性グレードとして耐久設計基準強度の区分を参考に呼び強度を 3 段階に分類し、構成割合を算定した。国内では細骨材の販売単価が高い地域等によっては、生コンのコストダウンのために、強度補正値を ΔF=0 として定め、28 日強度(現場水中)が Fc 以上であること、28 日コア強度が Fc の 70% を満たすこと、91 日強度が Fc 以上であることのうち、充足しやすい条件により強度管理をする場合もあるためである。この場合、呼び強度が Fc と同一になることがある。							
算定方法		①各シリーズにおける耐久性グレードの構成割合(一般、標準、長期)を確認 ②呼び強度と呼び強度比の積をとり、28 日材齢における管理強度を推定 ③呼び強度ごとに推定された全管理強度より全数平均強度を推定							
呼び強度 (N/mm ²)	耐久性 グレード	シリーズⅠ(全国区)				シリーズⅡ(首都圏)			
		構成割合 (%)	呼び強度 比	平均強度 (N/mm ²)	平均水セメント比(%)	構成割合 (%)	呼び強度 比	平均強度 (N/mm ²)	平均水セメント比(%)
18	一般	32.9	1.44	25.92	58.1	11.6	1.44	25.92	53.5
21			1.37	28.77			1.37	28.77	
24			1.37	32.88		35.0	1.37	32.88	
27	標準	47.1	1.38	37.26			1.38	37.26	
30			1.38	41.4		53.0	1.38	41.4	
33			1.36	44.88			1.36	44.88	
26	長期	20.0	1.33	34.58			1.33	34.58	
40			1.32	52.8			1.32	52.8	
全数	---	100(77864)	1.36	34.1		100(---)	1.36	38.5	

備考）平均水セメント比の算定は普通ポルトランドセメントの使用を想定し X=51/(F/60+0.31)より導出した。

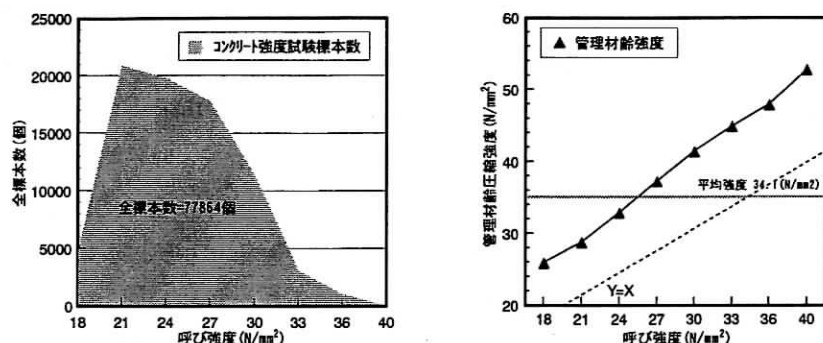


図 7.2.1 建築構造用コンクリートの呼び強度分布と管理材齢強度(シリーズ I)

7.2.3 環境シミュレーションの概要

(1) コンクリートの条件

表 7.2.2 に環境シミュレーションの設定条件を、図 7.2.2 に環境シミュレーションの対象となる各種コンクリートの循環形態を示す。

4 種類の建築構造用コンクリートは、順逆工程統合生産システムを導入した結果、構造物の構造安全性を確保する物質的性質に加え、コンクリートが廃棄されず再利用され地球環境負荷が小さくなる物質性能を備えたコンクリートが含まれている。NC-d は順工程生産システムに基づき製造され、簡便な逆工程で路盤材等に再生処理される(a)ダウンサイクリングコンクリート、NC-I は順工程生産システムに基づき製造され、高度な逆工程で構造用コンクリートとなる高品質再生骨材に再生処理される(b)レベルサイクルコンクリート、CRC-c は順逆工程生産システムに基づき製造され、セメント原料として全量がレベルサイクルされる(c)セメント回収型-完全リサイクルコンクリートおよび、CRC-a は順逆工程生産システムに基づき製造され、骨材原料として全量がレベルサイクルされる(d)骨材回収型-完全リサイクルコンクリートである。

各種コンクリートは、環境シミュレーションにおいて計画調合を定める必要があるため、構造用コンクリートの材料試験データの調査結果を基に、原コンクリートの水セメント比を 0.5 に定めた。再生コンクリートの水セメント比に関しては、NC-I および CRC-a については、再生骨材が高品質で回収されるため、原コンクリートと同一の 0.5 とし、NC-d および CRC-c については、再生骨材の低品質化による性能低下がありそれを補完するために、セメントペーストを高強度化して水セメント比を 0.4 とする。

(2) シミュレーションの条件

表 7.2.2 に環境シミュレーションの設定条件を、図 7.2.3 に日本の人口推計を示す。ここで示す設定条件を基に、西暦 2000 年から 2250 年までの期間におけるセメント製造量、コンクリート製造量、石灰石消費量および廃棄物発生量の 4 指標に関する推計を行う。

セメント製造量に関しては、4 種類のコンクリートを所定期間に一定量を製造し続けた場合のバージン材である普通セメントとコンクリートから回収される再生セメントの製造量を推計するものである。コンクリート製造量は、4 種類のコンクリートを所定期間に一定量を製造し続けた場合の初期コンクリートとその再生コンクリートの製造量を推計するものである。石灰石消費量は、埋蔵量および可採量を示すと同時に、4 種類のコンクリートを所定期間に一定量を製造し続けた場合、コンクリー

トおよび他産業分野で使用される石灰石の消費量の推計するものであり、(c)(d)の完全リサイクルコンクリートにおいて石灰石骨材を優先的に消費することは変動要因になるといえる。廃棄物質発生量は、4種類のコンクリートを所定期間に一定量を製造し続けた場合の最終処分されるコンクリート塊の発生量と、セメント製造起源二酸化炭素排出量の推計を行なうものである。

環境シミュレーションのパラメータであり、将来の構造用コンクリートの需給環境を考察するために必要となる4指標は、人口の増減に対応してコンクリート製造量に変化することを前提条件としている。本研究では、2000年まではコンクリート製造量の実績データ[9-11]を基に、それ以降は、国立社会保障・人口問題研究所にて示された人口推計値[11]を基に、国民1人当りのコンクリート平均消費量に人口を乗じることで、総コンクリート製造量の推定値を導出することとした。

表 7.2.2 環境シミュレーションの設定条件

記号	コンクリート名称	生産システム	水セメント比設定値		備考
			原コンクリート	再生コンクリート	
NC-d (down)	ダウンサイジング コンクリート	順工程 生産システム	0.5	0.5	高品質再生骨材を使用するため、原コンクリートを同様の水セメント比とする。
NC-l (level)	レベルサイジング コンクリート	逆工程付加型 順工程生産システム	0.5	0.4	低品質再生骨材を使用するため、再生コンの水セメント比を高める
CRC-c (cem.)	セメント回収型 完全リサイクルコンクリート	順逆工程 生産システム	0.5	0.4	再生骨材は低品質となるため、再生コンクリートの水セメント比は10%程度高めて使用する。
CRC-a (agg.)	骨材回収型 完全リサイクルコンクリート	順逆工程 生産システム	0.5	0.5	再生骨材は高品質となるため、再生コンクリートの水セメント比は、原コンクリートと同様とする。
主な 設定 条件	A.評価指標	1. セメント製造量 2. コンクリート製造量 3. 石灰石消費量 4. 廃棄物質発生量(最終処分コンクリート、二酸化炭素排出量)			
	B.材料条件	1. 普通ポルトランドセメントの比重=3.16 2. 普通ポルトランドセメント1tの製造に必要な石灰石量= 1.1 t 3. 普通ポルトランドセメントのCaO含有量=64.0% 4. 石灰石のCaO含有量=54.2% 5. 石灰石の密度=2.70(g/cm ³)			
	C.製造条件	1. コンクリートは普通ポルトランドを使用する 2. コンクリートは単位水量を180kg(原コンクリート)と175kg(再生コンクリート)に定める 3. コンクリートの生産量推計方法は、2001年までは実績データ[8-10]を使用し、2001年以降は、人口推計値(国立社会保障・人口問題研究所推計(1997年)[11])における高品位推計値より、1人当りコンクリート消費量(1997年実績)に人口を乗じて求める。 4. コンクリート生産最大量は、推計総人口のピークである2007年の最大量3億m ³ とし、以後95万m ³ /年の割合で低下すると仮定した。 5. CRC-aおよびCRC-cは、当初、全量がセメント原料に廻され、再生セメントの供給過剰時には、75%が再生骨材25%がセメント原料となる 6. CRC-cおよびNC-dより製造される低品質再生骨材は、セメントペーストが30%付着しているとする。 7. CRC-aおよびNC-lより製造される高品質再生骨材は、セメントペーストが付着していないものとする。 8. CRC-aおよびCRC-cの使用量は再生コンクリートで残りのセメント生産量が補えるようになるまで毎年5%ずつ増加する 9. 石灰石可採粗鉱量(国内)は140億トンとし、7割はコンクリート用、残り3割はその他の用途に確保する 10. 石灰石年間出荷量(国内)はコンクリート用は主にセメント製造量に比例し、現時点での骨材使用量は1100万トン、他用途は2800万トンで一定とする。 11. 石灰石埋蔵鉱量(国内)は580億トンとする 12. コンクリート以外の道路用およびその他用途の骨材消費量は、年間1.7億m ³ 一定とする。			
	D.解体処理条件	1. 構造物は建設後31～60年のあいだに均等割合で解体されるものとする。但し、一部の結果には、構造物の長寿命化に伴い建設後30～100年のあいだに均等割合で解体される場合の結果についても反映する。 2. 解体コンクリートの回収率はセンサス集計の場合95%とする。この時、総プロ集計の場合は40%とする。 4. 解体される普通コンクリートは、当初、その10%を再生骨材、50%を道路用に利用し残り40%を廃棄する。2010年(16年後)において、廃棄分0%、1/6を再生骨材、5/6を道路用に利用するように漸次変更する。但し、レベルサイクルによる逆工程を付加する再生処理の場合、再生骨材としての使用可能性が増大するため、50%を再生骨材、50%を道路用に利用する。 5. 解体される石灰石コンクリート、石灰石再生コンクリートは、その75%を再生骨材として利用し、残りの100%をセメント原料とする。 7. 解体される普通再生コンクリートは、将来の道路床板用砕石として用いる。 8. 二酸化炭素排出量は、セメント製造時のものとする。			

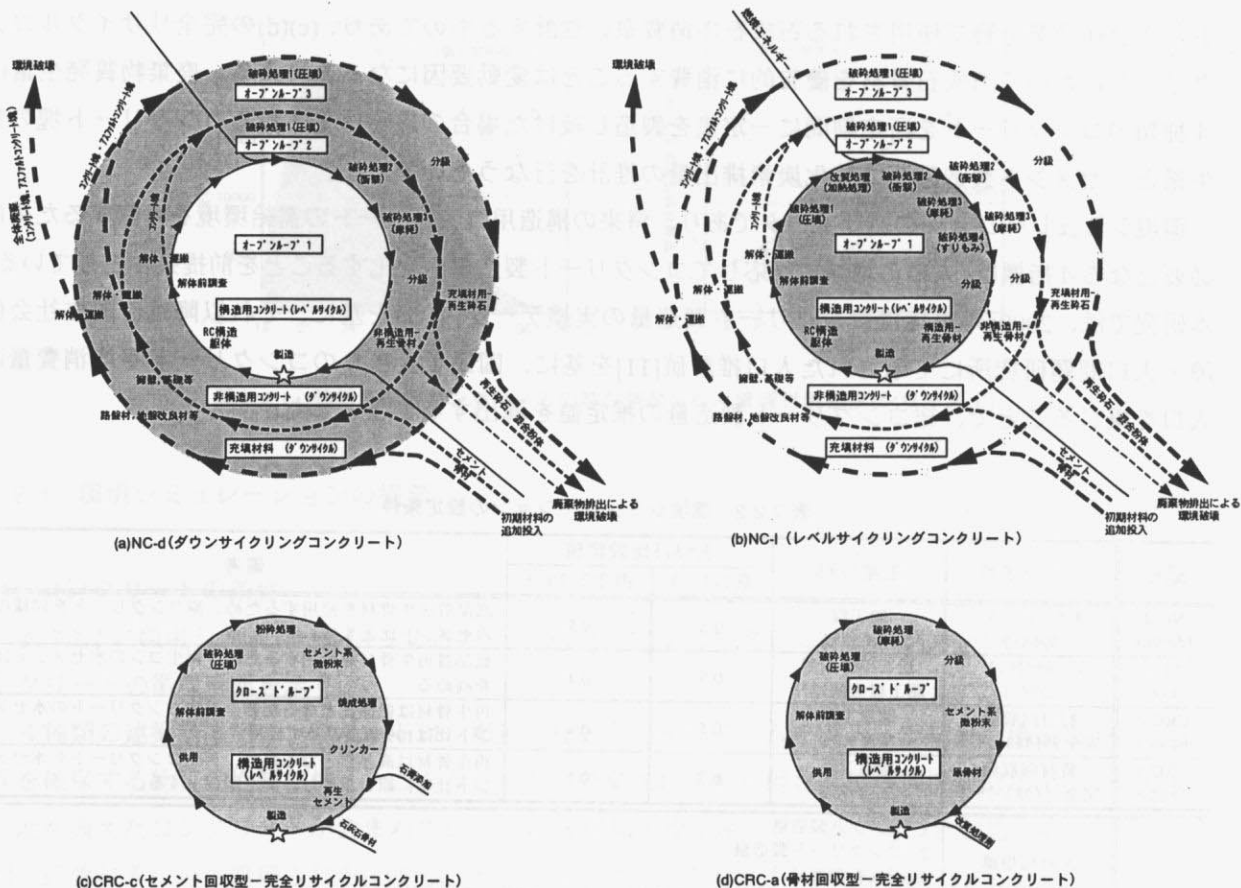


図 7.2.2 環境シミュレーションに適用する各種コンクリートの循環領域の違い

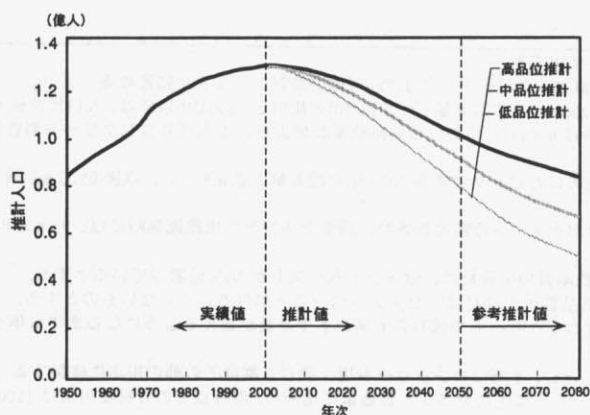


図 7.2.3 日本の将来人口推計[11]とコンクリート製造量

(コンクリート製造量の推計方法)

人口推計は、国立社会保障・人口問題研究所が 2000 年に公表した人口推計値を使用した。

将来のコンクリート製造量は、2000 年における国民 1 人あたりのコンクリート消費量である $1.6\text{m}^3/\text{年}$ が維持されるとし、これに対し総人口の将来推移（高品位推計）を基に、推計区間である 2250 年までの人口推計値に乗ずることで製造量を推計した。この場合、コンクリート生産最大量は、推計総人口のピークである 2007 年の 1 億 2778 万人時点における最大量 $3\text{億}\text{m}^3$ 程度となり、その製造量は、ピーク後は $95\text{万}\text{m}^3/\text{年}$ の割合で低下し、2100 年時(人口 9000 万)には、 $2.1\text{億}\text{m}^3$ 、2150 年時(人口 7000 万)には $1.64\text{億}\text{m}^3$ 、そして 2200 年時(人口 5000 万)には $1.16\text{億}\text{m}^3$ となることを仮定した。

(3) セメント製造量

推計の起点である 2000 年において、国内におけるセメント製造量は 9000 万トン程度であり、1996 年には過去最大のセメント製造量となる 10000 万トン程度に到達した[12]。製造されたセメントはポルトランドセメント等のバーজনセメントにより構成され、コンクリート微粉末を原料とした再生セメントの使用実績はこの時点ではないといえる。現在、再生セメントとして位置づけることが可能なものは、可燃性廃棄物の焼却施設で発生する焼却灰をセメント原料として用いたエコセメント[13]や、完全リサイクルコンクリート起源の再生セメントが挙げられる。エコセメントに関しては、2001 年に

JIS 化され、実務的な使用が可能になったが、他産業分野で発生した廃棄物を建設業に取り込む仕組みを有しており、コンクリート微粉末を再びセメント原料として利用するものではないため、最終処分コンクリートの発生抑制には繋がらないといえる。一方、完全リサイクルコンクリートはコンクリート塊の全量が再生セメントとなるので、最終処分コンクリートの発生抑制が可能であり、2000年には国内初の実構造物への適用を果たした。そして、部材の全量がセメント原料となるという付加価値を有した結果、当該建築物は施工後に移築を目的に解体されたが、コンクリート部材は実寸のまま再び構造部材として全量リユースされている。

図 7.2.4 にセメント製造量の推計結果(a~d)を示す。NC-d および NC-I は、順工程生産システムにより製造されるコンクリートであり、解体処理後のコンクリート微粉末をセメント原料に利用することは想定されていないため微粉末はセメント成分として不適合となり、再生セメント製造量は増加しない。NC-d の場合については、破碎時に混入される骨材成分が更に多くなるため、セメント原料としてほとんど使用することが不可能である。なお普通セメントは人口推計に比例して減少する構図となっているが、生産される絶対量は他の製品原料と比較して多いといえる。

CRC-c および CRC-a は、順逆工程生産システムにより製造されるコンクリートであり、コンクリート全量をセメント原料にすることができる。CRC-c に関しては、コンクリートをセメント原料とする際に、コンクリートに含有する石灰石骨材を脱炭酸化する必要があるが、コンクリート塊全量がセメント原料となるため集約的な供給が可能となり再生セメントとして利用され続ける可能性は高く、セメント原料となる構造物ストックが一定量に到達するまで製造し続けることができる。CRC-a に関しては、CRC-c と同様に全量をセメント原料化することも可能であるが、将来的には骨材ストック用の

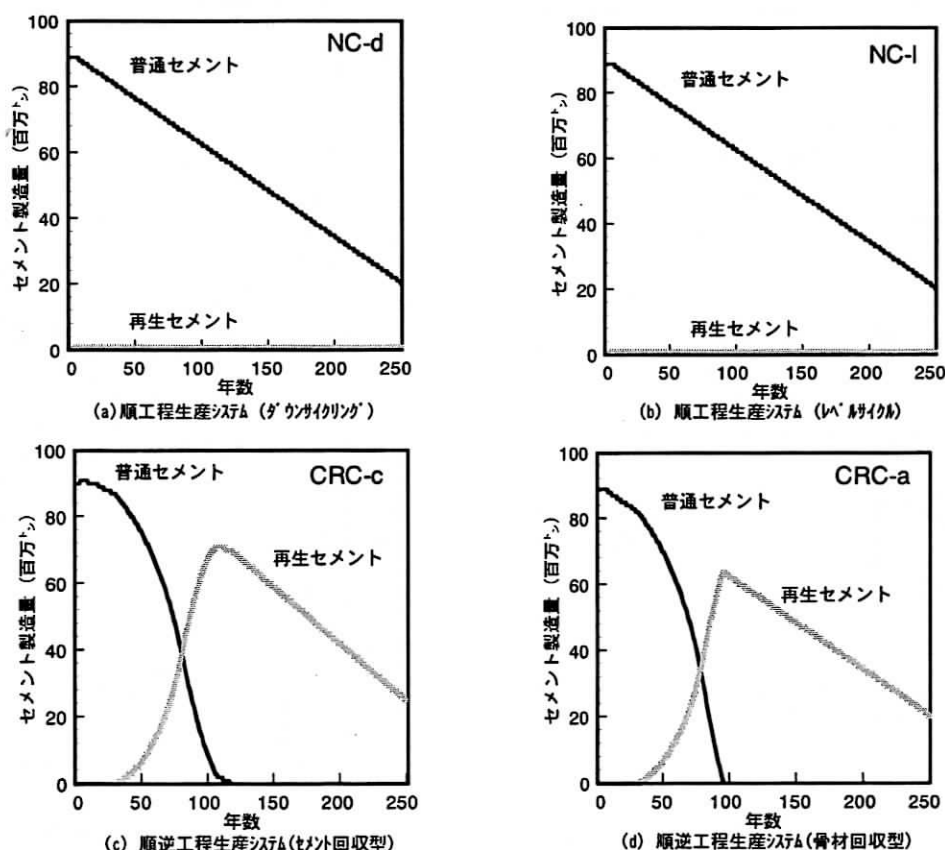


図 7.2.4 セメントの製造量

構造物が必要となるため、セメントストック用を製造開始してから一定期間経過後は、原骨材とセメントペースト分を分離採取してセメントペーストのみを再生セメント原料として用いることが適当である。この場合、コンクリートからセメント原料と骨材原料を同時に回収するため、資源の再投入が全くなくなる理想的なクローズドループが形成される。なお CRC-a と CRC-c の双方に該当する推計の特徴として、2000 年に CRC による構造物を一定の割合で製造し続けた場合、2030 年頃から再生セメントとなるコンクリート塊が発生し始め、同時に普通セメントの製造量が低下し始める。そして、2090 年までに普通セメントとの製造量は逆転し、2120 年までに天然資源を使用した普通セメントの製造は行われなくなり、すべてのセメント原料をコンクリート構造物から発生するコンクリート塊より供給することが可能となる。

(4) コンクリート製造量

推計の起点である 2000 年において、国内のコンクリート製造量は 2.7 億 m³ 程度であり、その後は人口の自然減および市場低迷の影響により、コンクリート生産量も低下する傾向を示すと考えられる。

図 7.2.5 にコンクリート製造量の推計結果(a～d)を示す。NC-d に関しては、順工程生産システムにより製造されるコンクリートであり、解体処理後にコンクリート中の骨材を回収することを想定した材料設計が適用されていない。従って、コンクリートとして再生する場合は、低品質再生骨材を用いた非構造用コンクリートとする方法、低水セメント比とした構造用コンクリートとする方法が適用可能であるが、耐久性、資源循環性に関して問題を有しており、構造用コンクリートに代替するには困難であるため、再生コンクリートとしての製造量は増加しない構図となる。

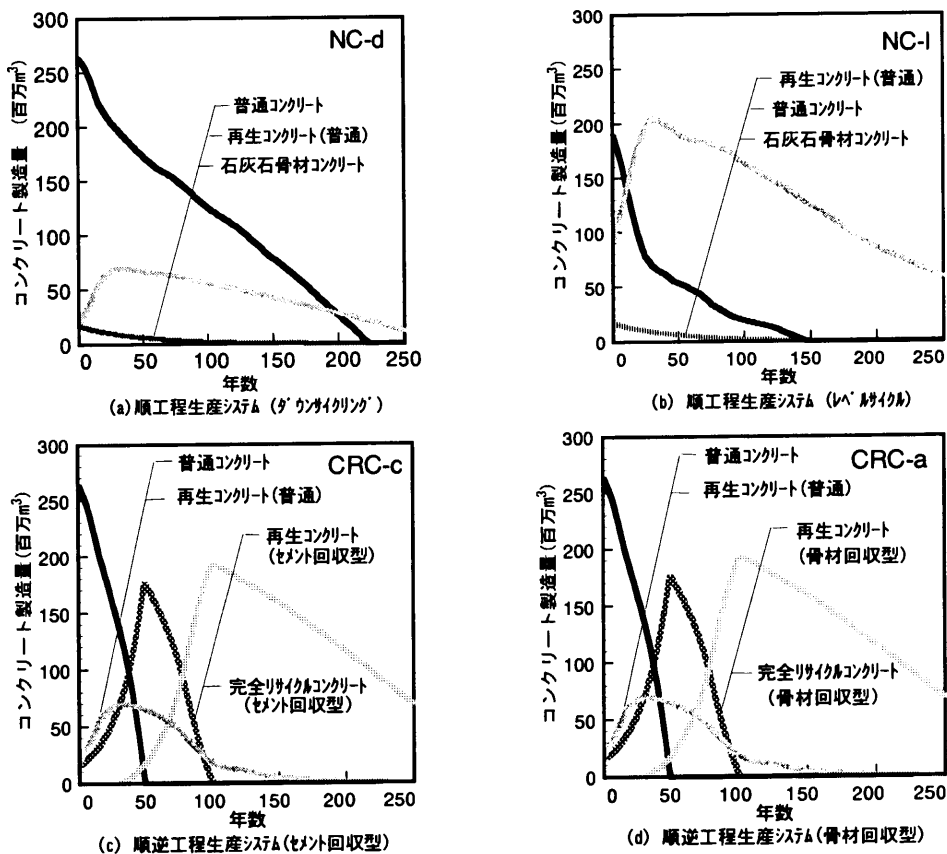


図 7.2.5 コンクリート製造量

NC-I に関しては、特殊な再生骨材製造装置を用いて積極的に高品質再生骨材を製造するため、その技術を実行した場合の生産システムは、逆工程付加型－順工程生産システムとして位置づけることが可能となる。再生コンクリートは、天然資源を使用した既存コンクリートと同等の品質を保持できるため、構造用コンクリートとして全量を代替することが可能となる。推計の特徴は、2050 年までにコンクリート製造量の半数以上が再生コンクリートで構成されるようになり、2150 年にはコンクリートの全量を再生コンクリートとすることが可能となり、骨材資源の全量を構造物から回収することも可能になる。

CRC-c および CRC-a に関しては、順逆工程生産システムにより製造されるコンクリートであり、コンクリート全量からセメント原料および骨材原料を回収することができる。従って、最終的に普通コンクリートを全く使用しない需給体系を構築することが可能となる。但し、CRC-c に関しては、セメント供給源となる構造物ストックが、一定量充足した後は、解体処理段階で全量をセメント原料化するのではなく、一部は再生骨材として回収する必要が発生する。その際、CRC-c は骨材回収性を考慮した材料設計を適用していないため高品質の再生骨材を得ることは困難であり、低水セメント比のコンクリートとして品質を高めた上で使用する必要がある。なお CRC-a と CRC-c の双方に該当する推計の特徴として、2040 年までに普通コンクリートと年間生産量が同等になり、同時期に CRC 起源の再生コンクリートの製造が開始され循環利用されるようになる。その結果、2050 年には普通コンクリートは製造されなくなり、それに応じて普通コンクリート起源の再生コンクリートの製造量も大きく減少し、2150 年頃には製造量が限りなくゼロに近づくと考えられる。

(5) 石灰石消費量

国内における石灰岩埋蔵量・鉱量は推定 560 億トン、可採鉱量は 140 億トンとされている。国内で採取される石灰岩は、海外の石灰岩と比較してセメント原料およびコンクリート用骨材にするための品質が優れたカルサイト含有率の高い石灰岩であり、全国各地で広く採取することが可能である。また石灰岩は国内で採取される全鉱石の 64% を占めており、国内で自給可能な唯一の岩石であるともいえる。完全リサイクルコンクリートはこの石灰岩より製造される石灰石骨材を基本構成材料としている。

図 7.2.6 に石灰石累積消費量の推計結果(a～d)を示す。NC-d に関しては、コンクリート用粗骨材として使用される石灰岩は、緩やかな増加傾向を示し、他産業分野で使用される石灰岩についても一定割合で増加するため全体では累積消費量は増加する結果となる。そして 2200 年から 2250 年の間に可採粗鉱量の限界に到達する。但し、埋蔵鉱量には到達しておらず、将来的に可採粗鉱量は増加する可能性があるため、岩石自体の採取は長期的に問題となるものではない。

NC-I に関しては、NC-d とほぼ同様の履歴を描くため、消費形態に大きな変化はもたらすものではないと考えられるが、高度処理により再生骨材が構造用コンクリートに使用可能となることから、石灰石粗骨材使用量の低下、副次的に生成したセメント系微粉末のセメント原料化などが期待され、結果的に石灰岩の累積消費量の増加を抑制することが可能となる。

CRC に関しては、CRC-a および CRC-c とともに順逆工程生産システムを前提とした材料設計が適用されるため、今後 100 年間は CRC 起源の構造物ストックを蓄積するために一時的に石灰石消費量が増大することになるが、2100 年前後からは石灰石骨材が材料として循環利用されるようになる結果、天然の石灰岩を採取する必要がなくなるために年当たりの石灰岩消費量は著しく減少して累積消費量は増加しなくなる傾向を示すことになる。

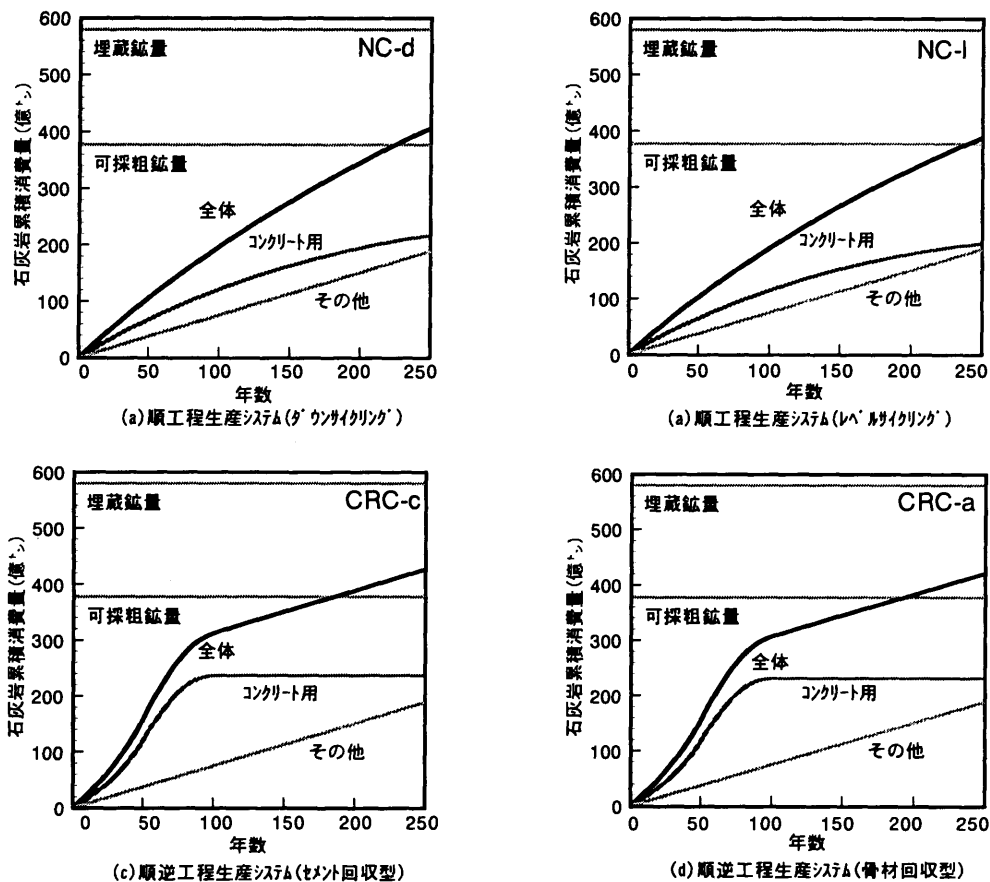


図 7.2.6 石灰石消費量

(6) 廃棄物発生量

現在の建設廃棄物の発生量、建設副産物の再利用率、最終処分量などの情報は、平成 12 年度における建設副産物実態調査(センサス)により概要が把握できる。建設廃棄物において実態把握がされている最終処分コンクリートは、平成 7 年度版センサスでは 1300 万トンであり、比較的、再生処理が進んでいるコンクリート塊でも最終処分量は発生している状況であるといえるが、平成 12 年度版センサスでは 130 万トンまで減少し、再利用率を 98% まで高める結果を導いた。その背景には再生処理技術の進歩に加え、社会システムが大きく変化しており、平成 8 年の建設リサイクル推進懇談会提言、平成 9 年の建設リサイクル推進計画、平成 10 年の建設副産物適正処理推進要綱の改正、平成 11 年の建築解体廃棄物リサイクルプログラムの策定、そして平成 12 年の建設リサイクル法の公布、資源リサイクル法の改正、廃掃法の改正等の政策の適用が大きく影響したといえる。しかしながら、実際の最終処分コンクリートは、建設発生土へのコンクリート塊の混入問題や不法投棄問題等により、計上されない廃棄物として相当量発生していることに留意する必要がある。二酸化炭素排出量に関しては、2000 年におけるセメント製造量に対し、セメント 1 トン製造時に発生する二酸化炭素排出量(749.5kg/t-cement)[14]を考慮した上での概算値として示した。

図 7.2.7 に最終処分コンクリートおよびセメント製造起源の二酸化炭素排出量推計結果(a~d)を示す。なおここでは環境シミュレーションの条件を追加した結果を示しており、対象となる全 4 種類のコンクリート構造物の解体期間を通常の建設後 31~60 年に加え、31~100 年の場合について同時に示し、コンクリート構造物の寿命が長期化した場合の影響についても検討している。

NC-d に関しては、最終処分コンクリートは 2050 年頃に発生量が最大になり、その後急激に減少する。これは、2000 年直前に竣工した普通コンクリートによる構造物の解体時期が、2030 年以降から開始される点、その間の新規コンクリート構造物の着工量が 2007 年をピークに低下し始める点などが影響した結果である。構造物が長寿命化した場合、解体時期の遅延に伴い最終処分量は大きく低下する。二酸化炭素排出量は、人口推移に相関があるセメント製造量に対応した履歴となっており一定割合で減少する傾向を示すが、これは 2000 年からの人口減少に伴う自然減が影響したものであり、二酸化炭素排出のための積極的な施策は盛り込まれたものではない。なお構造物が長寿命化した場合は、最終処分量コンクリートにおける変化と相違してセメント製造起源の二酸化炭素排出量はほとんど変化していないが、これは現在のコンクリート構造物の生産の仕組みとして、解体現場の発生率と新規コンクリートの製造要求との関係が不明確であるため、解体現場発生率の低下、つまり構造物の長寿命化がセメント製造量に及ぼす影響を指標化することが困難なためである。従って、長寿命化が果たされる場合においても、コンクリート製造量は基本的には人口推移に影響するものとして捉えられる結果、二酸化炭素排出量は大きく変化を示さない結果となる。なおコンクリート自身の耐久性と構造物の寿命概念を考慮し、設計段階において構造物の寿命予測が可能になる状況においては、解体現場発生率が算出可能になることから長寿命化とセメント製造量の関係を導出することが期待できる。

NC-I に関しては、最終処分コンクリートが、NC-d と比較して全体的に 60% 程度まで減少することが確認されたため、高度処理を適用してコンクリート塊から高品質の再生骨材を回収し、再び構造用

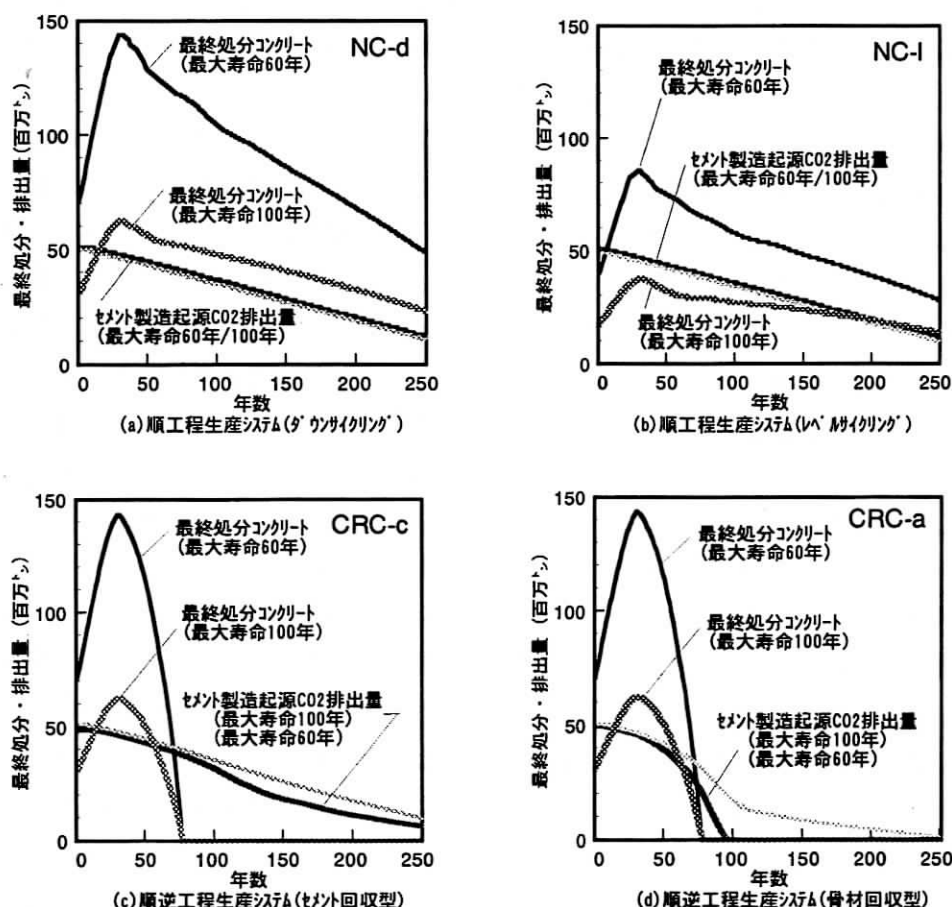


図 7.2.7 最終処分コンクリートおよびセメント製造起源二酸化炭素排出量

コンクリートに適用する効果が大きいことが示された。しかしながら、ポルトランドセメントの原料となるセメント系微粉末の回収は困難であるため、二酸化炭素排出量を低減する効果はなく、NC-dと同様に、セメント製造量の自然減に伴い二酸化炭素排出量が減少する傾向を示している。構造物が長寿命化した場合の特徴に関しては、NC-d とほぼ同様に考察される。

CRC-c に関しては、2000 年より製造が開始される CRC-c は、その全量がセメント原料として使用されるために、普通コンクリートによるコンクリート構造物が解体され、全量が最終処分された後は最終処分コンクリートは発生しない構図となり、2070 年頃には最終処分コンクリートは全く存在しなくなる。それ以降は、CRC-c 起源とした構造物ストックの全てがセメント原料のストックヤードとして位置づけられる状況を生み出すことになる。二酸化炭素排出量に関しては、人口減少に伴い発生する二酸化炭素排出量の自然減の影響に加え、一度、脱炭酸化して製造されたセメントを再びセメント原料として使用することが可能になるため、コンクリートにおけるセメントペーストの含有割合分に応じた二酸化炭素排出量を削減することが可能になる。推計値では 2030 年頃より、緩やかに二酸化炭素排出量が低下する傾向を示している。構造物が長寿命化した場合の特徴に関しては NC シリーズとほぼ同様に考察されるが、二酸化炭素排出量に関しては、構造物の長寿命化により所定期間におけるリサイクル処理回数が低下することとなるため、CRC-c におけるリサイクルの効果も低下する結果、NC シリーズと比較した二酸化炭素排出量の低減効果が減少し、排出量が若干増加する傾向を示すようになる。これは、リサイクル行為自体による環境負荷低減効果が対象となる製品寿命が長くなる場合には低下することを示している。

CRC-a に関しては、その全量がセメント原料および骨材原料として再生利用されるために、普通コンクリートによるコンクリート構造物全量が最終処分された後は最終処分コンクリートは発生しない構図となり、CRC-c と同様に 2070 年頃には最終処分されるコンクリートは全く無くなり、以降は CRC-a 起源とした構造物ストックの全てがセメント原料および骨材原料のストックヤードとして位置づけられる状況を生み出す。二酸化炭素排出量に関しては、コンクリートが改質処理骨材を使用しているため、簡便な解体処理によりセメント原料と骨材原料に分離採取することが可能である。従って、再生段階で回収される骨材以外の微粉末は、一度脱炭酸化して使用されたセメントにより構成されるため、生石灰化する段階で排出される二酸化炭素の発生が殆ど無く、2030 年以降は急激に二酸化炭素排出量が減少する状況を導くことを可能にする。なお、コンクリートの強度低減抑制の一手法であるセメントマトリックスの高強度化手法を適用する場合、セメント使用量が増大することになるが、材料としての循環が可能であることを考慮するとその要因は問題とはならない。2100 年頃には、セメント製造に起因する二酸化炭素排出量は完全に無くなり、セメント製造は、CRC-a の構造物ストックにおけるコンクリート中のセメントペーストを脱水して生石灰化しセメントとする構図が一般化するといえる。なお構造物が長寿命化した場合においては CRC-c とほぼ同様の内容が考察されるが、二酸化炭素排出量に関しては、構造物の長寿命化により所定期間におけるリサイクル処理回数が低下することとなるため、CRC-a における大幅に脱炭酸化が減少できるリサイクルの効果も低下する結果、NC シリーズと比較した二酸化炭素排出量の低減効果は減少し、排出量が増加する傾向を示すようになる。

以上より、CRC-c および CRC-a の製造は、最終処分コンクリートおよび二酸化炭素排出量の削減に対し、一定の効果が期待されるものとして理解できる。またセメント原料および骨材原料を構造物中で材料保存し、半永久的に蓄積・循環使用を可能とするものとして認識できるため、構造物の資源価値を高めると同時に長寿命化を促す効果も期待できるようになるといえる。

7.2.4 まとめ

本節では、建築構造用コンクリートの環境シミュレーションについて検討した。以下に得られた知見を示す。

1) セメント製造量は、順工程生産システムにより製造されたコンクリートの場合、人口の自然減に比例して低下する傾向にあるが、順逆工程統合生産システムによる完全リサイクルコンクリートの場合、100年程度で普通セメントは使用されなくなり、再生セメントにより全量を賄うことが可能になる。

2) コンクリート製造量は、順工程生産システムにより製造されたコンクリートでは、ダウンサイクルの場合、セメント製造量と同様の変化となるが、レベルサイクルの場合、再生コンクリートの製造量が拡大的に増加する。順逆工程統合生産システムによる完全リサイクルコンクリートでは、従来型コンクリートの製造は短期間で終了し、その後再生完全リサイクルコンクリートが繰り返し製造される。

3) 最終処分コンクリートは、順工程生産システムにより製造されたコンクリートでは、レベルサイクルによる更新を実行することで処分量を大きく低減することが可能になる。順逆工程統合生産システムにより製造された完全リサイクルコンクリートでは、100年以内に最終処分コンクリートが全く発生しなくなる状況を導く。またセメント製造起源の二酸化炭素排出量に関しては、骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおいて大幅に低減が可能となり、循環利用される状況下では、製造時に二酸化炭素を発生しないコンクリートとして位置づけることも可能となる。

7.3 構造用コンクリートの LCCO₂削減の方策

地球温暖化防止のために 1997 年の地球温暖化防止京都会議(COP3)で締結された京都議定書を発効するための国際的な合意が 2001 年の地球温暖化防止マケラシュ会議(COP7)においてなされたのは記憶に新しい。この合意により、先進国およびロシア東欧諸国(気候変動枠組み条約付属書 I 国)は 2008 年から 2012 年の第一期約束期間における温暖化ガスの排出量を、1990 年度比で平均 5%の削減を義務づけられることになる。そして、これらの目標を達成するための具体的手法が京都メカニズムであり、現在は、その基本的な仕組みである排出権取引、共同実施(JI)、グリーン開発メカニズム(CDM)を基にした運用施策を出来るだけ早期に構築し、温暖化排出ガスの削減を促すとともに、世界規模での排出権取引の新市場を構築し、排出権コンサルタントや排出権認証ビジネスなどの新しい仕事を生み出す気運が高まっている。

2002 年になり米国が京都議定書の批准に改めて難色を示したため、京都議定書はスタート時に最大の二酸化炭素排出国である米国抜きで発効される国際制度となる可能性は大きいが、現在は 2000 年 1 月に開始された世界銀行炭素基金などの各種排出権ファンドの運用、2001 年より検討段階に入ったオランダにおける共同実施(JI)の先行運用、2002 年 4 月の英国の排出権取引市場の開始、2005 年に予定されている EU での排出権取引市場の開始などの京都メカニズムを利用した世界的な地球温暖化防止に向けた取り組みの進展などにより、早かれ遅かれアメリカを含めた地球規模での動向に発展するものと思われる。

日本においては、温暖化排出ガス削減に向けて、2008 年から 2012 年の第一期約束期間における排出量を 1990 年度比で平均 6%の削減が必要となる。国内施策における排出量削減の導入ステップ[15]の構成は、事業的取り組み(事業者の取り組み、協働による民生・運輸の取り組み、国・自治体の取り組み)および社会システムの運用(京都メカニズム、排出権取引、森林吸収源、環境税制)に大きく分類され、建設業では事業的取り組み(協働による民生・運輸の取り組み)の枠組みの中で、計画策定、施策実施、排出量把握そして評価結果に基づく PDCA サイクルの導入を計画的に実施することになる。コンクリート構造物に関する方策として、建築物の断熱強化、屋上緑化の義務づけなどが現時点で示されているが、セメント製造による二酸化炭素排出量の削減もその対象になるものと考えられる。

コンクリート構造物の生産における温暖化ガスの排出要因とされる材料製造、施工、解体、処理行為における環境負荷量の内訳を、一般的な構造物(容積 100m³)を想定した LCCO₂ の試算結果[15]から検討してみると、LCCO₂における 82.3%が材料製造によるものであり、そのうちセメント製造は全体の 39.4%を占めるとされている。現状において、セメントクリンカー 1 トンを製造するために排出される二酸化炭素量は 800~1000kg 程度であること[14]を踏まえると、セメント製造が温暖化物質排出の元凶となることが明らかである。そのため、近い将来建設サイドからの二酸化炭素排出量削減を本格的に検討するためには、セメント製造による排出量を削減することが不可欠になるといえる。そして、セメント製造による二酸化炭素排出量の削減は、集約的処理が期待できるため、効果的に温暖化物質排出量を低減することも可能になるといえる。

セメント製造における LCCO₂ 削減方法について検討する。製造方法に関しては、現在のセメント工場は、クリンカー燃焼効率を向上させるために NSP キルンが積極導入され、現在の導入率は 90%程度[17]となっており、1960 年当時は単位クリンカー重量(kg)当たりの燃料消費量が 5750KJ 程度であ

ったところが 1990 年には 3000KJ 程度となるまで効率化が進んでおり、燃料消費量が半減する状況を実現している。しかし、それ以降の削減率は頭打ちの状態にあるため、製造技術に関しては最も効率の良い状態が既に確保されているといえる。従って、製造手法による新たな削減率の増加は多くは期待できないといえる。一方、原料改質による方法に関しては、エコセメント[13]の開発事例が挙げられる。セメント成分を代替可能な産業廃棄物を積極利用することで石灰岩の使用量を削減し、脱炭酸による二酸化炭素排出量を大きく低減することが可能になる。2002 年には JIS R 5214 に規格化されており、今後製造が増加して従来型のセメントと代替できる構図が描かれれば、LCCO₂ の削減に繋がると考えられる。しかしながら同手法は他産業分野のループで発生する産業廃棄物を主原料とすることが前提条件となっており、産業廃棄物の状態や回収量および化学組成などがセメントの品質安定性に影響する点、重金属類等の混入に起因する物質の濃縮汚染の可能性、他産業の廃棄物を原料とした上で広域的な産業領域を囲んで構成されるオープンループにおいて相対的に高度な処理技術に基づく再生処理手法で再生を実行することになる点など、環境負荷の少ない資源循環の仕組みを構築する上で今後問題となる要因がいくつか存在することは否定できないといえる。またこの方法論は、他産業分野における産業廃棄物をセメントの製造システムを利用して対処療法的に処理する手法として位置づけてオープンループの循環形態となることを前提としている点に関しても、将来的に解決が必要となる潜在的問題と考えられる。

一方、本研究において提案した完全リサイクルコンクリートは、エコセメントと同様に二酸化炭素排出量の削減を可能にする性質を保持している。しかしながら、完全リサイクルコンクリートがエコセメントと根本的に相違する部分は、他産業を含まないクロズドループによる循環系の構築を前提としている点、構造物に要求される総合的な性質をライフサイクル設計の観点から具体的に捉え直し、新しく導出される材料としての本質的機能を充足した上で生産物に使用される点と考えられる。そしてこの場合、順逆工程生産システムを導くことが可能となり、最終的には解体処理段階における環境負荷を大きく低減することが期待できると考えられるのである。

以上、建設業において二酸化炭素排出量の削減に寄与するセメント製造のあり方について、エコセメントおよび完全リサイクルコンクリートを事例とした手法について考察した。双方の手法は一見対峙する性質を帯びたものとして示されたが、実際にはどちらの手法が地球温暖化物質の削減に効果的であるかは、その実務的な使用量に大きく左右されるため現時点では不明であるといえる。ここで改めて、二酸化炭素排出量削減の概念自身の特徴について検討する必要性がでてくるといえる。

地球温暖化防止の最終目的というものは、そのひとつに将来的な地球の温度上昇の抑制を前提とした上で、それを達成するために温暖化原因物質を排除することが掲げられている。目標達成の手法は実際には非常に数多く存在し、その中には地域的な制約条件なども加えられる可能性もあるため、結果的に直接制御および間接制御による手法を問わず、最終目的を明確に見据えた上で具体的手法を適用して定期的にその達成度を検証し、手法の実行不適正が明白になった場合は、直ちにその仕組みを排除して再び新しい手法を導入するという繰り返し作業の継続に目標達成が可能になると思われる。このような適応性検証型の手法は、建築物における性能検証型設計[18]において建築物の本質的機能を明確にしてそれを長期に渡り充足するために必要な物質性能の目的を目的指向型の生産プロセスで実現する手法における基本的な理念と重ねられる印象がある。

つまり私論となるが、建築物においてリサイクルという更新工程を通じ、地球温暖化物質の排出を削減する生産方法を実現するためには、建築物自身および地球温暖化物質削減手法の特殊性により、

再生処理を実施する本質的意味を正確に捉え、その上で建築物の設計哲学を具体化しなければ、温暖化物質削減を含めた環境負荷低減を実行可能にするリサイクルを軌道に乗せることは困難になるのではないかと考える。

ここで設計哲学という言葉を示したが、その意味に込められている「哲学」に関してひとつの説明[19]がある。その内容は、『哲学とは、誰もがもつ自分なりの価値観や倫理観を「補強」するためのものというよりか、むしろ「検証」する方法のことである。哲学的な思考を適用することにより、既存の信念や理論であっても、新たに学習した物事との比較により、その妥当性を検討することが容易になり、場合によってはその方向性を変えることも辞さないのである。』というものである。つまり、建築物の設計哲学とは、例えば、コンクリート構造物の場合、コンクリートを打設した後に何らかの形で長期的な強度特性が十分に確保されないことが発覚した時点で、当該箇所のコンクリートを解体して再打設することや、設計変更を行った上で補強を実施することなどを生産行為の一環として一般化することである。視点を広げれば、竣工直後の建築物が LCA 手法などにより将来的に環境負荷を多大に与えると評価された場合、その環境負荷を低減するために付加的な技術対策を積極的に講じることを生産行為の一環として一般化することなども該当するであろう。

以上より、日本における過去の公害問題や今日世界規模で発生している地球環境問題というものは、その問題を引き起こした原因と想定される順工程生産システムを基盤としたものづくり自身に環境負荷を考慮した上で生産合理性を検証する設計哲学が存在してこなかったために引き起こされたものと捉えることができる。結果、多くの生産システムは多大な環境負荷を与える製品を数多く生み出すことになり、一度発生した環境問題に対しては対処療法的な対策しか適用することができずに原因治療的な対策を講じることが困難となり、結果的に問題は解決されないまま悪化の一途を辿る構図が生み出されたと考えられるのである。

本研究において提案した材料保存を基調としたコンクリート構造物のライフサイクル設計手法は、既存の生産システムである順工程生産システムの仕組みを根本的に見直し、そこに存在していた問題点の解決を前提に新たに想起して具体化された手法であるため先に述べた設計哲学が反映されているといえる。結果、新たに生産されるコンクリート構造物は、逆工程の生産時において大きな環境負荷が発生しない順逆工程統合生産システムを実現することができる。

コンクリート構成材料の材料保存性を確保した完全リサイクルコンクリートを使用し、ライフサイクル設計を導入したコンクリート構造物というものは、今後、建築市場での適応性を始め、社会的浸透性、さらには地球環境への適応性が検証されることになる。それは今まさに始まろうとしている地球環境時代において、既存のコンクリート構造物では検証が困難であった新しい生産システムに対する初めての試みになると考えられるのである。

7.4 第7章のまとめ

本章では、建築構造用コンクリートの環境シミュレーションおよび LCCO₂ 削減の施策について検討した。以下に得られた知見を示す。

1) セメント製造量に関する環境シミュレーションの特徴として、順工程生産システムにより製造されたコンクリートの場合、人口の自然減に比例して低下する傾向にあるが、順逆工程統合生産システムによる完全リサイクルコンクリートの場合、100 年程度で普通セメントは使用されなくなり、再生セメントにより需用を賄うことが可能になる。コンクリート製造量に関しては、順工程生産システムにより製造されたコンクリートでは、レベルサイクルの場合、再生コンクリートの製造量が大きく増加させることができる。そして順逆工程統合生産システムによる完全リサイクルコンクリートでは、普通コンクリートの製造を早くに終了させることができ、その後は数次に渡り再生完全リサイクルコンクリートが製造される体系を構築することができる。

2) 最終処分コンクリートに関する環境シミュレーションの特徴として、順工程生産システムにより製造されたコンクリートでは、レベルサイクルによる更新を実行することで処分量を大きく低減することが可能になる。順逆工程統合生産システムにより製造された完全リサイクルコンクリートでは、100 年以内に最終処分コンクリートが発生しなくなり。また二酸化炭素排出量に関しては、骨材回収型リサイクル指向コンクリートにおいて大幅に低減が可能になり、製造段階において二酸化炭素を発生しないコンクリートとすることが可能になる。

3) 順逆工程統合生産システムを導くライフサイクル設計は、既存の生産システムである順工程生産システムの仕組みを再考し新たに想起して構築されたものであり、設計哲学が反映されている。その材料要因となる完全リサイクルコンクリートによるコンクリート構造物は市場や地球環境における適応度が今後検証されることになり、それは既存の構造物では検証できなかった新しいシステムに対する初めての試みと位置づけられる。

第7章の参考文献

- [1] ロバート・ハービソン著 浜田邦裕訳：建築と非建築のはざまで,鹿島出版会,1995
- [2] 上田完次：自然・生命からの発想 生物志向型生産システム,工業調査会,1994
- [3] IPCC Third Assessment Report(TAR), Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001
- [4] The cement sustainability initiative our agenda for action, World Business Council for Sustainable Development,2002
- [5] 社団法人日本建築総合研究所機関誌 GBRC,vol25,no.3,p.61,2001
- [6] 日本建築学会：地球温暖化への建築分野での対応,建築雑誌,Vol.113,No.1417,pp.90-91,1990
- [7] 仙田満：地球環境・建築憲章制定について,建築雑誌,Vol.115,No.1458,pp.3-5,2000
- [8] 社団法人セメント協会：セメント協会 50 年のあゆみ,1998
- [9] 工藤勝弘：骨材産業の現状と今後の課題,セメントコンクリート,No.618,pp.14-25,1998
- [10] 経済産業省：生コン統計年報,2000
- [11] 国立社会保障・人口問題研究所：日本の将来推計人口,2000
- [12] 社団法人セメント協会：セメント・コンクリート,セメント需用概況,No.667,2002
- [13] T.Shimoda and S.Yokoyama: Eco-cement -A New New Portland Cement to Solve Municipal and Industrial Waste, Proceedings International Congress On Creating with Concrete, Modern Concrete Materials, Dandee, UK, pp.17-30, 1999
- [14] S.Sano and Japan Cement Association, Proceeding of the Fourth International Conference on Ecobalance, p.497,2000
- [15] 政府中央環境審議会：地球環境部会国内小委員会第 11 回委員会資料, Available Web Site
- [16] コンクリートの環境負荷評価,コンクリートの技術シリーズ No.44,土木学会,2002
- [17] Cement in Japan 2000, Japan Cement Association,2000
- [18] 野口貴文：鉄筋コンクリート造建築物の性能検証型耐久設計,コンクリート工学 Vol.40,No.5,pp.59-66,2002
- [19] 竹田青嗣：言語的思考へー脱構築と現象学ー,径書房,2001

第8章 結論

本研究の結論

本研究の着想は、1970 年代初めから今日に至るまで、長期に渡り継続的に研究開発されてきた再生コンクリートが、現在においても構造体へ使用することが困難な状態にあり、路盤材や用途制限のある非構造コンクリート用再生骨材として部分的に使用される程度に止まっており、次世代に向けて抜本的な変化が期待できる新たな方策が必要と判断された点にある。また昨今の地球温暖化を中心とした地球環境問題が、それほど先ではないむしろ近い将来において人間の生活を脅かす様々な問題を引き起こす可能性が認識されるようになり、例えばそれは中長期的に発生する大規模地震により構造体が損傷を受け、建築として使用が困難になる確率よりも高い確率、つまりより早い期間内に危機的要因をはらむ環境問題が発生することが予想されるため、コンクリート構造物生産において地球環境問題の解消手段を積極的に導入し、未然防止を可能にする仕組みを早急に構築する必要性が考えられた点も挙げられる。なお地球環境問題の中には、現在はその全容は明らかされていないが、一度問題が顕在化すると事後的な対応では解決が極めて困難となる新しいタイプの地球環境問題も今後発生してくる可能性がある。この場合、既存の生産システムによる対処療法的な解決手法では、事態の改善・解消が困難になる可能性が多分にあるといえる。

現在の地球環境問題は、究極的には人口減少に伴い経済活動の規模を世界的に小さくすれば地球の自浄作用が回復して徐々に解消するものと思われる。しかしながら人間社会というものは、そもそも経済活動を前提に成立しており、昨今では、既存の順工程における生産システムの改善を実施することよりも先に、この前提条件を維持した上で循環型社会を構築するという最も達成レベルの高い目標を掲げた取り組みが行われる状況となっている。この背景には、地球環境が切迫した状況になっても、地球は人間のために存在し、地球が自浄作用を完全に喪失する限界状態に至るまでは基本的に人間の経済活動を中心とした社会システムと市場における競争原理の確保を最優先させるべきというような誤った認識が働いているからではなかろうか。

なおここで言う限界状態とは、地球の自浄能力が有効に機能しなくなり、その結果、地球温暖化問題さらには地球環境問題が深刻化して経済活動を優先した生活ができなくなる状態と位置づける。具体的には、IPCC 報告書(TAR)のデータを用いて説明すれば、今後 1990 年から 2100 年までの期間における地球の地上平均気温は 1990 年レベルよりも 1.4~5.8℃上昇し、その影響により海面水位が 0.09~0.88m 程度、全地球上で平均的に上昇することが予測されているが、これは経済活動を営む人間の生活域が大幅に減少させ、中には陸地の大部分が海面下になる地域が発生することを想像させるものである。この場合、高い確率で既存の生活スタイルを持続させることは困難となるため、経済活動を優先した社会スタイルは事実上崩壊すると考えられる。また二酸化炭素などの温室効果ガスは、発生量の 25%程度が数百年にわたり大気中に残留するために、21 世紀初頭に温室効果ガス発生濃度が低い状態で安定したとしても、その後も 100 年間あたり 0.2~0.3℃の割合で地球全体の温度は上昇すると予測されている。

以上の内容より、次世代におけるコンクリート構造物のあり方、さらにはコンクリート構造物が地球環境に与える影響に関する研究の最終目標というものを具体的に見出すことが必要と考えられた。なおこの目標は、例えるならば限定された地域における社会の問題を扱う次元の目標ではなく、地球環境を守るために必要となる最後目標を具体化することであるため、現在想定可能な問題解決に向けた最善の方策を示し、それに向けて積極的に問題解決を図る意義は大きいといえる。なお適用された

方策の妥当性を検証することは一般的に困難となるが、将来的に発生する可能性の高い問題となる要因を予め十分に考慮しその発生リスクを最小限に抑えるようなリスクマネジメントを実行することで、一定の効果を期待することは可能と考えられる。

なお先に述べた経済活動の限界状態に至るまでの期間を人間にとっての経済活動余命期間と定める場合、問題解決のための具体的事例としては、地球温暖化と始めとする種々の地球環境問題を積極的に解消することが可能となるコンクリート構造物の生産が挙げられる。ここで私論となるが、現時点で想定される経済活動余命期間を IPCC 報告における海面水位上昇の影響を考慮して数百年程度とした場合、現在の日本における各種建築物の更新周期が住宅の 30 年を始めとする数十年程度で構成されることを考慮すると、それらは経済活動余命期間の数分の 1 から数十分の 1 の寿命と見なすことができる。つまり経済活動が盛んな地域におけるコンクリート構造物は、今後少なくとも数回から数十回は更新されると想定できるのである。このような更新周期に関する特徴を考慮すれば、最終目標としては建築物の再生処理段階を生産工程の一部と位置づけた建築生産システムを具体化し、天然資源の非枯渇型利用や最終処分廃止を積極的に努めることが現状の日本において必要な目標として位置づけられるといえる。なお SI 建築に例えられる躯体の長期耐久性を設計段階で予め考慮した構造物においても、現段階においては、用途に応じて部材や材料の本質的機能を企画設計に導入した上での長寿化設計が適用されていないこと、さらには経済活動余命期間のあいだには少なくとも数回は解体されることが想定できることなどにより、結果的に構造物からは建設廃棄物が発生して環境負荷を与える可能性があるのである。

現在、国内においては集約的にコンクリート用骨材を採取することは容易ではなくなっており、近年においては堆積岩層よりも一般的に下層にあり、アルカリシリカ反応性を有する火成岩起源の岩石をコンクリート骨材として使用するような状況も発生している。バージン資源の枯渇問題に関しては、海外から廉価で大量の骨材を輸入し品質調整を行った上で運用する仕組みを構築すれば、一定の解決が図られると考えられるが、この場合、マテリアルフローにおける廃棄系アウトプットの増加が更に顕著となるため、結果的に最終処分場の残余年数を急激に縮めるような状況を導くであろう。また海外などで実施されている廃棄物の鉱山化処理手法に関しても、日本では廃棄物を鉱山化させられる土地の確保が困難であること、また鉱山化することを目的とした処置を施したとしても、廃棄物が蓄積して安定な鉱山となる速度よりも埋没した廃棄物による土壌汚染や土地利用問題に関する環境劣化現象がより早く発生して事態が深刻化することなどが考えられるため、同手法のみで問題解決を図ることはほぼ困難と思われる。以上のことから、国内のコンクリート構造物生産の基本条件としては、現在確保できる良質な骨材ストックを構造用コンクリートの構成材料として最大限使用し、極力廃棄物を発生させないことが掲げられる。この場合、順工程生産システムに基づく既存のコンクリート構造物は良質な骨材の貯蔵庫と見なすことが可能になるため、現在主流であるダウンサイクリングによる再生材の需要が存在し続ける一定期間は同手法を有効活用し、その間に高品質再生骨材製造技術に基づく完全リサイクル型の循環システムを実行可能な状態にし、ダウンサイクリング再生材の需要が消失した時点で高品質再生骨材による構造用再生コンクリートの生産システムを全面運用することが適当であると考えられる。そして新規構造物に関しては、コンクリートの構成材料を完全にリサイクルして材料保存性が確保できる設計手法を予め導入し、解体処理後のコンクリート塊からバージン骨材およびセメント原料を容易に回収可能とする順逆工程統合生産システムの導入が必要と考えられるのである。

本研究は、上記目標を達成するために、既存コンクリート構造物における生産システムおよびリサイクル技術の問題点の解明および将来的なあり方の提示、新規コンクリート構造物における材料保存性を確保するための完全リサイクル技術とそれに基づく構造物のライフサイクル設計手法の提示を行った。始めに、第2章における既往の研究に関する文献調査を行った結果、以下に示す分析結果を得た。すなわち、

- (1) 従来型コンクリートの再資源化を促進するためには、現状の廃棄物発生量データを明確にすることが必要条件となるが、世界規模的な問題点としてコンクリート構造物から発生する廃棄物の定義が不明瞭であるため、結果的に廃棄物発生量のデータベースが完備されない。コンクリート構成材料の生涯は「ゆりかごから墓場まで」を前提とせず、「循環」を前提とした上で廃棄物の全ての状態を包含する体系化・定義化が必要である。
- (2) 従来型コンクリートの再資源化は、適用地域における社会的ニーズを正確に捉えることが最優先される。社会的ニーズは適用地域における廃棄物発生量データと再資源化に関連する基準、指針および運用の方策の習熟度によりある程度の判断が可能である。そして破碎装置を中心とした技術レベルの客観的評価により、目標とする再資源化レベルの達成可能性を推測することも可能になる。
- (3) リサイ클ラブル製品の資源循環化手法は、循環の根本原理として製品の構成材料における最もエネルギー的負荷の大きいマテリアルリサイクルの実行可能性を考慮した上で、その段階に至らないようにするための種々の仕組みを合理的に導入するという仕組みで設計を行っている。コンクリート構造物の資源投入量、生産工程におけるエネルギー消費量および廃棄物発生量を考慮すると、同様の仕組みの適用により、環境負荷低減を図る可能性は多分にあると考えられる。
- (4) リサイ클ラブル製品とすることで部分的かつ一時的にエネルギー負荷が増大する可能性があるが、大域的・長期的には、環境負荷が低減できることが条件となる。この場合、製品循環系の規模に応じて合理的に運用するための方策を積極的に導入することが不可欠となる。そして方策による効果を含めた製品自身の経済的価値さらには環境的価値を定量化することで、地球環境時代における生産システムの真の合理化が図られると考えられる。
- (5) 日本におけるコンクリートの資源循環化の目標レベルは、資源賦存量、最終処分場残余容量、廃棄物発生量データ、再資源化に関連する基準、指針、運用の方策の習熟度、破碎装置の技術レベルおよび普及度等の条件を基にした絶対評価ならびに世界各国における同一条件を基にした相対評価により判断すると、マテリアルリサイクルを前提とした構造物の設計手法を導入することが必要な段階にあり、それが現在の社会的ニーズになっていると考えられる。それを可能にするコンクリートは、骨材とセメントを解体後に容易に回収可能にするコンクリートであり、構造物のライフサイクルを考慮した設計法が導入されていることが条件となる。

従って、本研究では、以下の内容を具体的な研究目標として掲げ、調査、実験および解析を通じて広範な問題に対する検討を行った。

- 1) 既存建築生産システムにおける問題点の明確化
- 2) コンクリート構造物のライフサイクル設計手法の構築
- 3) セメント回収型ー完全リサイクルコンクリートの実証化
- 4) 骨材回収型ー完全リサイクルコンクリートの実証化

上記1)の既存の建築生産システムにおける問題点の明確化に関しては、第3章において、既存のコンクリート構造物の生産システムを順工程生産システムと位置づけ、その仕組みに内在する資源循環の阻害要因を明らかにした。そして抽出された問題点を改善・解消するための方法論を導出し、閉じた系で資源循環を可能にするために必要な新しい概念を示した。

上記2)のコンクリート構造物のライフサイクル設計手法の構築に関しては、第4章において、閉じた系内で完全に資源循環化を可能とする構造用コンクリートを前提とした構造物の設計概念を明確にすることで、構造物のライフサイクル設計手法が構築されることを示した。

上記3)のセメント回収型－完全リサイクルコンクリートの実証化に関しては、第5章において、成分調整不要型完全リサイクルコンクリートに関する基礎的物性、汎用型骨材を使用した完全リサイクルコンクリートに関する拡大利用を想定した標準調合表の作成および同コンクリートの基礎的性質、セメント回収型－完全リサイクルコンクリートの実構造物への適用性評価を検討し、コンクリートにおけるセメント原料の材料保存性を説明した。

上記4)の骨材回収型－完全リサイクルコンクリートの実証化に関しては、第6章において、セメントペーストと骨材との易分解性を容易に確保が可能となる改質処理骨材の開発、それをを用いたコンクリートの基礎的物性、破壊特性およびリサイクル性に関する実験および解析により検討し、コンクリートにおける骨材原料の材料保存性を説明した。

そして最後に、第7章において、既存コンクリートを対象とし、再生処理を考慮しない順工程生産システム、再生処理を実施する逆工程付加型－順工程生産システム、そしてセメント回収型および骨材回収型－完全リサイクルコンクリートに基づく順逆工程統合生産システムによる需給環境のシミュレーションを行い、上記3)および4)で提案された完全リサイクルコンクリートを構造用コンクリートとして一般化することの妥当性を検証した後に、コンクリート構造物により地球温暖化防止を中心とした地球環境問題の改善・解消に向けて、実行可能な方策の方向性を示した。

以下に、本研究の第3章以降において得られた知見を総括して示す。

第3章は、「コンクリートの材料保存性が導く生産システム」と題し、資源循環の共通言語、既存コンクリート構造物の生産システム、解体コンクリート塊のリサイクルシステムについて検討し、以下の知見を得た。

- (1) コンクリート構造物のライフサイクル設計を検討する場合、コンクリートの原料概念、コンクリート構成材料の循環形態、構造物の更新形態の整理が必要である。
- (2) コンクリート構造物の生産システムは、順工程生産システム、逆工程付加型－順工程生産システムおよび順逆工程統合生産システムに大別することが可能であり、現在の日本は、逆工程付加型－順工程生産システムに加え、順逆工程統合生産システムの導入が必要である。
- (3) 構造物のライフサイクル設計に順逆工程統合生産システムを適用した場合、コンクリート構成材料の材料保存性が確保される。
- (4) 順工程生産システムを起源としたコンクリート塊から得られる再生製品は再生砕石、低品質再生骨材コンクリート、高品質再生骨材コンクリートの全6種類で構成され、循環形態は、環状のオープンループを形成する。

素材 (Raw Material)

将来的に製品の部品になりうる物質により構成され、製品の部品とすることを目的とした処理が施される直前の物質群。当該物質群において、部品を構成する成分の含有率は高くある必要がある。

材料 (Resource)

製品全般に使用可能な部品のことで、製品の部品とすることを目的とした処理が施された物質。製品に取り込まれ部品化した状態においても、部品の組成は維持され、製品の性能は確保される。

原材料 (Intended Material)

特定製品に使用可能な部品のことで、特定製品の部品とすることを目的とした処理が施された物質。特定製品に取り込まれ部品化した状態において、部品の組成が維持されることは考慮されず、特定製品の性能は確保される。

材料保存性 (Resource Conservability)

製品に適用された部品が、製品の解体分離後に品質・性能の低下を生じないまま、同程度以上の性能を有する製品の部品として使用可能な状態が維持されており、製品を媒体として材料が循環し続ける性質

ダウンサイクル(リング) (Down Cycle (Cycling))

再生材料(再生原材料)を再生製品の部品として使用する場合、バージン材料を用いた製品と比較し、再生製品における品質・性能の低下が発生し、材料保存性が確保されない更新形態(状態)

レベルサイクル(リング) (Level Cycle (Cycling))

再生材料(再生原材料)を再生製品の部品として使用する際、バージン材料を用いた製品と比較し、再生製品における品質・性能の低下が発生せず、材料保存性が確保される更新形態(状態)

リサイクル (Recycle)

廃棄工程を包含するダウンサイクルおよびレベルサイクルにより構成される更新形態の総称

オープンループ (Open Loop)

製品が使用限度に到達し、製品もしくは部品の更新を行なう場合、廃棄要素もしくは新規投入要素が発生し、循環領域が拡大する循環形態

クローズドループ (Closed Loop)

製品が使用限度に到達し、製品もしくは部品の更新を行なう場合、廃棄要素もしくは新規投入要素が発生しないで循環領域が拡大しない循環形態

ゼロエミッション (Zero Emission)

設計段階で廃棄物の発生抑制を可能にする材料選定手法を適用するか、解体処理段階で再資源化処理を行うことで別のループへの原料化を果たすことで、当該ループで発生する物質系廃棄物をゼロに近づける取り組み

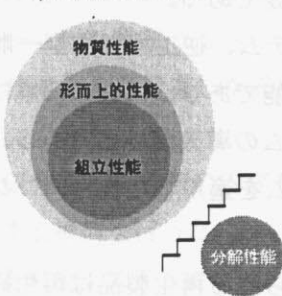
ライフサイクル (Life Cycle)

構造物に使用される構成材料の材料保存性を考慮した場合は、構造物の設計、生産、供用および処理(再資源化)に関わる明確にされた時期区分

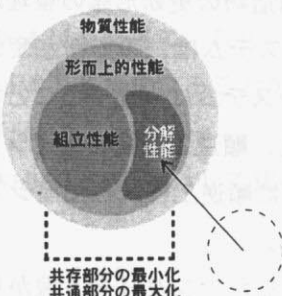
順工程生産システムを起源としたコンクリートの再資源化に関わる諸問題

問題点	内容
品質低下	再生コンクリートは、一般的に原コンクリートよりも性能低下する。材料設計時に製品の逆工程を考慮しないため、骨材の性能が自然に低下するからである。その再生システムは、廃棄物発生を低減する効果はあるが、再生コンクリートの性能・価値まで回復できない。
供給不安定	再生コンクリートは、既存構造物から発生した再生骨材を原料とし、メンテナンス用に備蓄した再生骨材を原料としないため、必然的に、原料回収量の変動し、再生コンクリートの供給量も不安定になる。
価格不安定	再生コンクリートの市場価格は、原コンクリートとの比較により決定されるため、それ自身の処理コストの増減に関わらず、原コンクリートのコスト変動の影響を大きく受ける。また上記のような品質低下のため、必然的に価格が低下する傾向にある。
流通不安定	品質、供給、価格の不安定性が存在する再生コンクリートを継続的に需給し、安定的な循環生産を実現するためには、根本な問題の解決が不可欠である。従って、現時点では、再生コンクリートによる閉じた循環系を構築することは困難を極める。
環境負荷増加	順工程生産システムを維持したまま、逆工程システムの整備およびリサイクル品の合理的運用を実行する場合、多大な環境負荷が発生する。地球環境的な持続性を考慮した場合、リサイクルよりもエネルギー的に有利な廃棄処分が適当であるという見解が頻発するようになる。

a) 順工程生産システム



b) 逆工程付加型-順工程生産システム



c) 順逆工程統合生産システム

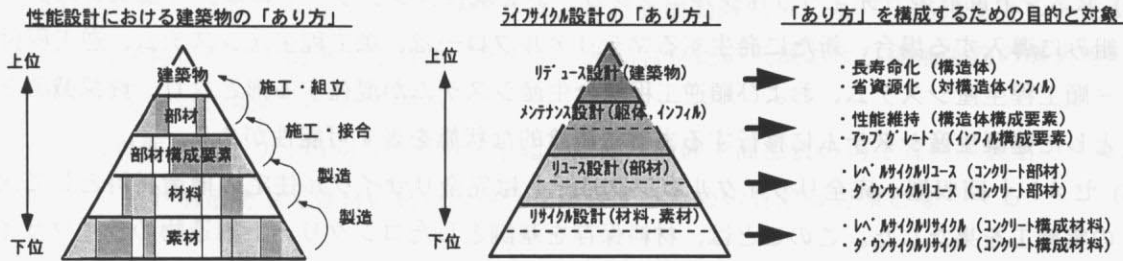


備考) 共存部分: 分解と組立が別系統となる領域
共通部分: 分解と組立が同一系統となる領域

順逆工程の統合化概念モデル

第4章では、「コンクリート構造物のライフサイクル設計手法」と題し、ライフサイクル設計のコンセプトおよびライフサイクル設計の実装手法について検討し、以下の知見を得た。

- (1) ライフサイクル設計に包含される個別設計要素は、リデュース設計、メンテナンス設計、リユース設計およびリサイクル設計の4種類で構成される。
- (2) 個別設計要素の設計目的は、長寿命化、省資源化、性能維持、アップグレード化、レベルサイクルリユース化、ダウンサイクルリユース化、レベルサイクルリサイクル化、そしてダウンサイクルリサイクル化の8種類で構成される。
- (3) 材料保存を可能にするコンクリートの導入により、クローズドループによりコンクリート構造物の構成材料を循環させることが可能とするライフサイクル設計が成立し、それにより順逆工程統合生産システムが導かれる。
- (4) 既存コンクリート構造物における材料保存を可能にするライフサイクル設計の適用度は低く、構造物の長寿命化、解体処理段階におけるコンクリート構成材料の再資源化は合理的に実行されない。



ライフサイクル設計に包含される個別設計要素のヒエラルキー

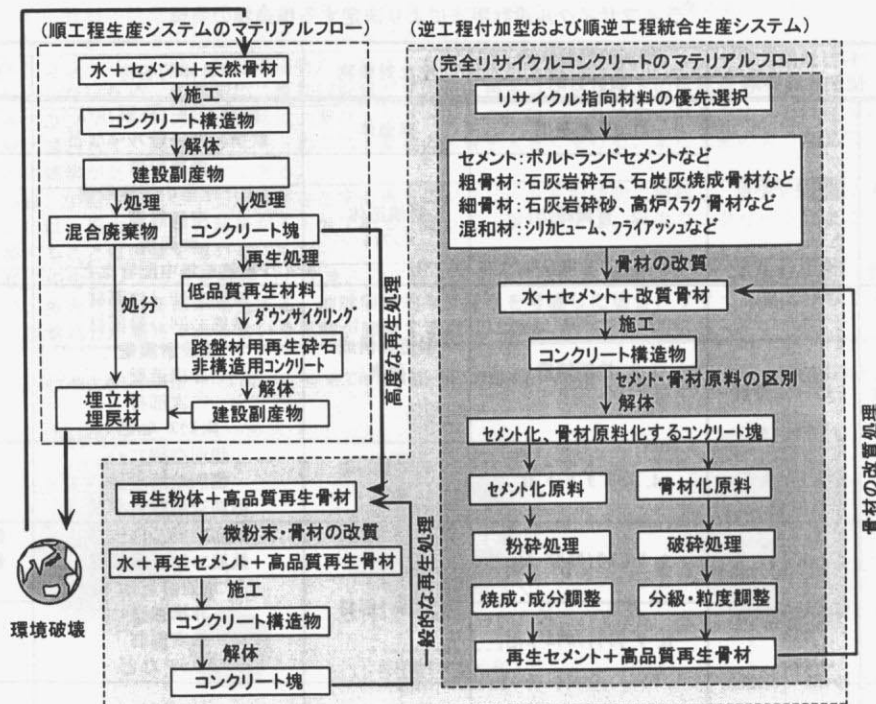
ライフサイクル設計手法により決定する構造物の特徴

物質性能 ヒエラルキー	ライフサイクル設計の 個別設計要素		個別設計要素の 設計目的	主な対象物	具体的名称	更新後の利用方法
建築物	A	リデュース設計	1. 長寿命化	構造体	鉄筋コンクリート柱梁フレーム 鉄筋コンクリート壁フレームなど	左に同じ
			2. 省資源化	対構造体 インフィル	動線設備 上下水集中管理設備 空調設備 共同溝 電気系集中配管など	左に同じ
部材	B	メンテナンス設計	3. 性能維持	構造体構成 要素	鉄筋コンクリート柱部材 鉄筋コンクリート梁部材 増設耐震壁 非構造壁 二次部材 床スラブ など	左に同じ
			4. アップグレード化	インフィル構成 要素	個別空調ユニット 個別給湯設備 個別空調設備など	左に同じ
部材構成 要素	C	リユース設計	5. レベルサイクルリユース化	コンクリート部材	鉄筋コンクリート柱部材 鉄筋コンクリート梁部材 増設耐震壁 非構造壁 二次部材 床スラブ など	鉄筋コンクリート柱部材 鉄筋コンクリート梁部材 増設耐震壁など
			6. ダウンサイクルリユース化		非構造壁 二次部材 床スラブ など	
材料 (素材)	D	リサイクル設計	7. レベルサイクルリサイクル化	コンクリート 構成材料	細骨材 粗骨材 セメント硬化体など	原骨材 セメント原料
			8. ダウンサイクルリサイクル化		低品質再生骨材 粉体	

備考) 個別設計要素(4種類)と設計目的(8種類)により構造物の要求性能および特徴が明確になる。

第5章では、「セメント回収型－完全リサイクルコンクリートの実証化」と題して、成分調整不要型完全リサイクルコンクリート、完全リサイクルコンクリートの利用拡大に向けた材料調整法、および完全リサイクル住宅への実施工と適用性評価について検討し、以下の知見を得た。

- (1) 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートは、材料的価値に乏しく最終処分される傾向がある産業廃棄物起源材料をコンクリートに適宜導入して廃棄物起源材料の最終処分量を抑制するとともにコンクリートの全量が成分調整不要のまま普通セメントとなるため、セメント原料としてコンクリート中で材料保存する意義は大きい。
- (2) 汎用型石灰石砕砂およびその粒形改善石灰石砕砂は骨材としての品質に優れ、将来的に完全リサイクルコンクリートにおける標準的な石灰石砕砂として位置づけられるものであり、得られるコンクリートは構造用コンクリートとして実務的な使用に耐えうる性能を導出できる。
- (3) 完全リサイクルコンクリート標準調合表は完全リサイクルコンクリートの普及を図ることを考慮して作成されており、構造用コンクリートの計画調合を行う際の基礎資料として実務的に使用することが可能である。
- (4) セメント回収型－完全リサイクルコンクリートを既存コンクリートの順工程生産システムの枠組みに導入する場合、新たに発生するマテリアルフローは、順工程生産システム、逆工程付加型－順工程生産システム、および順逆工程統合生産システムが混在する形となり、資源循環を基調とした建築生産システムに移行するまでの過渡的な状態を表す可能性がある。
- (5) セメント回収型－完全リサイクルコンクリートは完全リサイクル住宅の構造材料として国内初の実施工を果たした。このことは、材料保存を基調としたコンクリート構造物のライフサイクル設計において、レベルサイクルによるリサイクル設計が実務的に適用されたことを意味する。



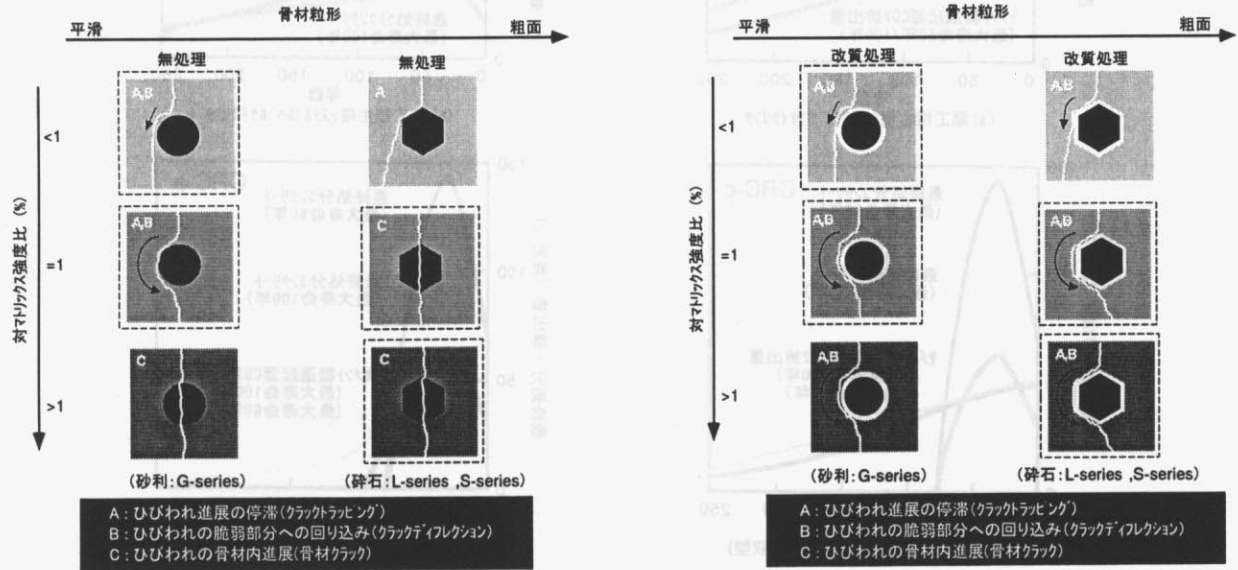
既存コンクリートと完全リサイクルコンクリートが混在するマテリアルフロー

第6章では、「骨材回収型－完全リサイクルコンクリートの実証化」と題して、ペースト界面との易分解を可能にする骨材の開発、骨材回収型リサイクル指向コンクリートの基礎的性質、破壊特性、リサイクル性評価について検討し、以下の知見を得た。

- (1) 易分解性骨材は、骨材表面平滑化により骨材界面における物理的な組み合わせに伴う付着を低減する物理処理法と、骨材界面の水和抑制化により水和に伴う付着を低減する化学処理法により製造可能であり、骨材界面剥離効果を発現する。
- (2) 骨材界面付着力低減効果には水セメント比依存性および骨材粒形依存性があり、骨材界面がマトリックスと骨材に対して相対的に脆弱化する程度と、粒形に起因する無処理の場合と比較した骨材界面の機械的な組み合わせ力低減の程度によりその効果の発現性が変化する。
- (3) 骨材界面付着力低減効果による骨材界面へのひび割れ回り込み作用により、ひび割れ進展長さが増大してコンクリート破壊が延性的になる可能性があり、その特性は粒形が角張った改質処理骨材を使用したコンクリートに顕著に再現されるため、今後、実務的な使用が拡大する高強度碎石コンクリートは、骨材回収型リサイクル指向コンクリートとするのに適している。
- (4) 骨材回収型リサイクル指向コンクリートは、骨材界面剥離効果により圧縮強度等の弾性限界における力学特性が若干低下する特性があるが、水結合材比の低減および横補強筋の導入等の対策により強度低減の抑制が可能である。
- (5) 骨材回収型リサイクル指向コンクリートは、簡便な破碎で高品質の再生骨材が製造できるため、コンクリート構造物中で骨材の材料保存性を確保するための有効な方策となりうる。

易分解性骨材による改質処理効果

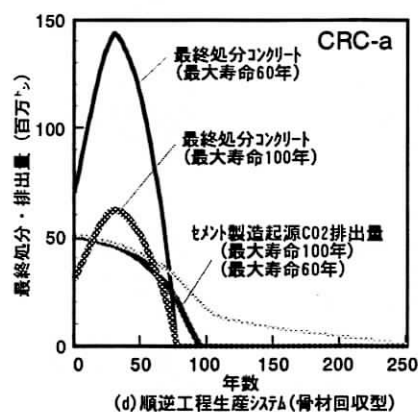
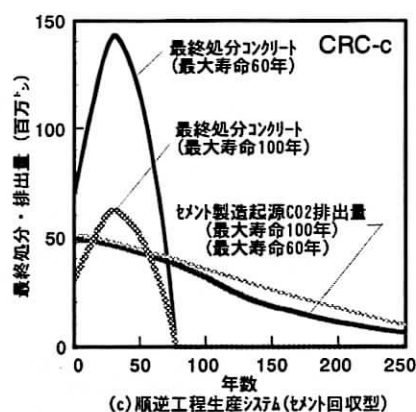
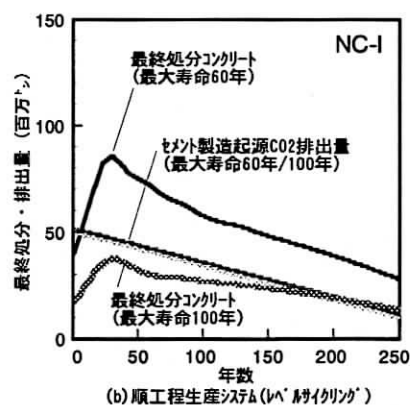
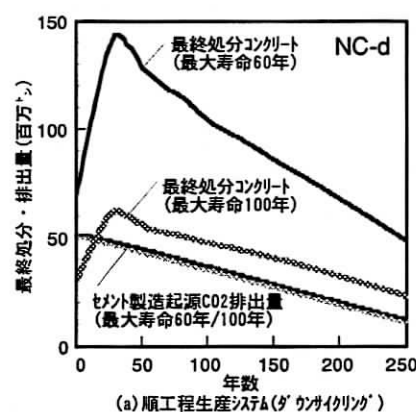
	化学処理法
	鉱物油、油脂を主成分とし、鉱物油における親油基を含む分子群はセメント水和物とは表面エネルギーの差に基づく非接触状態を確保する。油脂に含まれるエステル系化合物は、コンクリート中の金属イオン存在下でアルカリ条件における加水分解を起こし、不溶性アルカリ金属塩（金属セッケン）および酸を生成する。改質骨材の微細界面では、主にこれらの反応・状態により通常のセメント水和物の生成は抑制され、骨材界面の付着力が化学的に低減される。
	物理処理法
	コンクリートの摩耗処理・打継処理等に使用される合成樹脂系エマルジョン溶液であり、接着被膜の形成が容易でありセメント水和物中で安定である。骨材表面の凹凸面や微細空隙には、改質処理剤が充填し、骨材形状に影響しない程度に骨材表面が平滑化し、骨材界面とセメント水和物間に発生する機械的な付着力が物理的に低減される。



改質処理骨材によるコンクリートのひび割れ進展機構(左：無処理 右：改質処理)

第7章では、「建築構造用コンクリートに関する需給環境の将来予測」と題して、建築構造用コンクリートの環境シミュレーションおよびLCCO₂削減の施策について検討し、以下の知見を得た。

- (1) 将来のセメント製造量は、順工程生産システムにより製造されたコンクリートの場合、普通セメントの使用はなくなる。順逆工程統合生産システムを導く完全リサイクルコンクリートの場合、100年程度で普通セメントの使用はなくなり再生セメントで需用を満たすことが可能となる。
- (2) 将来のコンクリート製造量は、順工程生産システムにおいてダウンサイクルによる更新の場合、普通コンクリートは引き続き製造され、レベルサイクルによる更新の場合、再生コンクリートの製造量は拡大する。順逆工程統合生産システムを導く完全リサイクルコンクリートの場合、普通コンクリートは速やかに製造されなくなり再生完全リサイクルコンクリートによる循環系が成立する。
- (3) 将来の最終処分コンクリートは、順工程生産システムにおいてレベルサイクルによる更新をする場合、最終処分量を大きく低減できる。順逆工程統合生産システムを導く完全リサイクルコンクリートの場合、100年以内に最終処分コンクリートが発生しなくなる状況を導く。
- (4) 将来のセメント製造起源の二酸化炭素排出量は、順逆工程統合生産システムを導く完全リサイクルコンクリートにおいて大幅に低減することが可能であり、コンクリートにおける材料保存性を可能にすると同時に、地球温暖化を抑制するための一方策として位置づけることが可能となる。
- (5) 順逆工程統合生産システムの実現を可能とするコンクリート構造物のライフサイクル設計手法は、順工程生産システムの仕組みを根本的に見直して新たに想起したものであり、新たに得られるコンクリート構造物は、既存コンクリート構造物では成立し得なかった社会システムや地球環境に対する適応性を検証することが可能性になる。



最終処分コンクリートおよびセメント製造起源二酸化炭素排出量の環境シミュレーション

以上、本研究の結論を各章ごとに総括して示した。

ここで 1998 年冬、カナダのオタワにて開催された Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry に関する国際会議にて、友澤により示された「リサイクルの二大原則」を以下に示す。

I Recycling should be of high quality.

II Recycling should be repeatable.

I は、リサイクル製品は高品質であることが必要であるとする原則であり、リサイクル製品の品質に対する顧客満足度が得られなければ市場性は育たないことを意味している。II は、リサイクル製品は繰り返し利用されることが必要であるとする原則であり、リサイクル製品自体にリサイクルの可能性がなく結果的に最終処分しなければならない場合は、それは次世代の廃棄物を生産していることになり、循環型社会の原則に対する矛盾が生じることを意味している。本研究の検討は、このリサイクルの原則に示される真に求められるリサイクルの意味を、調査、実験、解析を通じて読み解き、コンクリート構造物における資源循環を可能にする生産システムの将来像を具体化するものであったとも説明できよう。

以上、本研究は建設活動において生産段階での環境負荷が大きいとされるコンクリート構造物を対象に、閉じた系内での資源循環を可能にするライフサイクル設計手法を提示した上で、セメントおよび骨材の材料保存を可能とする完全リサイクルコンクリートの基礎的物性と実務的な使用可能性について検討し、最終的に順逆工程統合生産システムが導出される仕組みと地球環境時代に適したコンクリート構造物のあり方を提示した。本研究で得られた方法論は、既存の建築生産システムを検証を主とした哲学的思考により省みた上で成立しており、「地球の安定」に必要となる「物質循環」保持に貢献するための建設サイドから提示可能な一方策になると考えられる。

本研究がコンクリート構造物に最終的に求められる、資源循環システムの仕組みづくりに資すれば幸いである。

Glossary

関連文献リスト

Glossary

素材：将来的に製品の部品になりうる物質で構成され、部品化とすることを目的とした処理が施される直前の物質群。当該物質群において、部品を構成する成分の含有率は高くある必要がある。

材料：製品全ライフサイクルに渡り使用可能な部品のことで、製品の部品とすることを目的とした処理が施された物質。製品に取り込まれ部品化した状態においても、部品の品質は保持された上で製品の性能は確保される。

原材料：特定製品に使用可能な部品のことで、特定製品の部品とすることを目的とした処理が施された物質。特定製品に取り込まれ部品化した状態において、部品の品質の保持は考慮されず、特定製品の性能のみが確保される。

材料保存性：製品に適用された部品が、製品の解体分離後に品質・性能の低下を生じないまま、同程度以上の性能を有する製品の部品として使用可能な状態が保持されており、製品を媒体として材料として循環し続ける性質。

ダウンサイクル：再生材料(再生原材料)を再生製品の部品として使用する場合、バージン材料を用いた製品と比較して、製品の品質・性能の低下が許容され、材料保存性が確保されない形で更新する形態。

ダウンサイクリング：再生材料(再生原材料)を再生製品の部品として使用する場合、バージン材料を用いた製品と比較して、製品の品質・性能の低下が許容され、材料保存性が確保されない形で更新している状態。

レベルサイクル：再生材料(再生原材料)を再生製品の部品として使用する際、バージン材料を用いた製品と比較して、製品における品質・性能が保持され、材料保存性が確保される形で更新する形態。

レベルサイクリング：再生材料(再生原材料)を再生製品の部品として使用する際、バージン材料を用いた製品と比較して、製品における品質・性能が保持され、材料保存性が確保される形で更新している状態。

リサイクル：廃棄工程を包含するダウンサイクルおよびレベルサイクルにより構成される更新形態の総称。

オープンループ：製品が使用限度に到達し、製品もしくは部品の更新を行なう場合、廃棄要素もしくは新規投入要素が発生し、循環領域が拡大する循環形態。

クローズドループ：製品が使用限度に到達し、製品もしくは部品の更新を行なう場合、廃棄要素もしくは新規投入要素が発生しないで循環領域が拡大しない循環形態。

ゼロエミッション：設計段階で廃棄物の発生抑制を可能にする材料選定手法を適用するか、解体処理段階で再資源化処理を行うことで別のループへの原料化を果たすことで、当該ループで発生する物質系廃棄物をゼロに近づける取り組み。前処理ゼロエミッションと後処理ゼロエミッションが存在する。

ライフサイクル：構造物に使用される構成材料の材料保存性を考慮した場合は、構造物の設計、生産、供用および処理(再資源化)に関わる時期区分。

順工程生産システム：製品および構成材料の易分解性を考慮せず、生産におけるコスト低減および効率に重点を置いたシステム。

逆工程付加型－順工程生産システム：順工程生産システムの解体処理段階で、廃棄物の発生がないようにするために、再資源化処理を適用する生産システム。設計段階で考慮していない再資源化処理を検討することになるため一般的にエネルギー的な負荷は増大する。

順逆工程統合生産システム：同一系統の組立性・分解性を保持した構成材料を使用し、生産の順工程を合理化しつつ逆工程が一貫させることで、資源循環性が確保される生産システム。

リデュース設計：ライフサイクル設計の4大個別設計要素のひとつであり、構造物の本質的機能として、構造体および構造体インフィルに対し、耐久性を確保して長寿命化につなげる機能、初期および更新時における資源投入量低減を可能とする機能を有しており、両者を設計目的として位置づける設計手法。

メンテナンス設計：ライフサイクル設計の4大個別設計要素のひとつであり、構造物の本質的機能として、構造体構成要素およびインフィル構成要素に対し、一定期間の性能を維持するための機能、定期的な更新により性能向上を果たす機能を有しており、両者を設計目的として位置づける設計手法。

リユース設計：ライフサイクル設計の4大個別設計要素のひとつであり、構造物の本質的機能として、コンクリート部材に対し、更新により品質が低下することなく再生部材として使用が可能になる機能、更新により品質が低下したうえで再生部材として使用が可能になる機能を有しており、両者を設計目的として位置づける設計手法。

リサイクル設計：ライフサイクル設計の4大個別設計要素のひとつであり、構造物の本質的機能として、コンクリート構成材料に対し、更新により品質が低下することなく再生材料として使用が可能になる機能、更新により品質が低下したうえで再生材料として使用が可能になる機能を有しており、両者を設計目的として位置づける設計手法。

ライフサイクル設計：構造物の資源循環を目的に複数の個別設計要素を階層化した総合的設計手法であり、コンクリート構成材料を設計対象とした「リサイクル設計」、コンクリート部材を設計の対象とした「リユース設計」、構造体構成要素およびインフィル構成要素を設計の対象とした「メンテナンス設計」、構造体および対構造体インフィルを設計対象とした「リデュース設計」の4大個別設計要素により構成される。

構造物の本質的機能：ライフサイクル設計における個別設計要素を具体化するために必要となる8つの機能であり、個別設計要素の「設計目的」として位置づけることが可能である。個別設計要素の設計対象となる基本構成要素（構造体、対構造体インフィルなど）を特定することが可能とする。

セメント回収型－完全リサイクルコンクリート：セメントおよびセメント原料となる物質のみがコンクリートの結合材、混合材および骨材として用いられ、硬化後、再度全ての材料がセメント原料および再生骨材として利用可能であるコンクリート。

成分調整不要型－完全リサイクルコンクリート：コンクリート自身がセメント用クリンカーと同等の化学組成を持つように、石灰石骨材および産業廃棄物起源材料を中心とした各種材料を使用して、再資源化段階で成分調整不要な状態でその全量がセメント原料となるセメント回収型－完全リサイクルコンクリート。

骨材回収型リサイクル指向コンクリート：コンクリートの力学特性に過度な低下が生じない程度に原骨材表面に改質処理を施して、骨材－マトリックス間の付着力を低減し、原骨材を容易に回収することを可能とするコンクリート。リサイクル指向性の意味は、同コンクリートが骨材回収性の向上を前提としながらも、構造物用コンクリートとして適当な力学特性の確保が可能であるため、長期耐久性の確保を目的とするコンクリートとすることも可能になるためである。

骨材回収型－完全リサイクルコンクリート：石灰石骨材を使用することで、セメント回収型－完全リサイクルコンクリートと同様に全量をセメント原料化する性質を保持しつつ、骨材回収型リサイクル指向コンクリートの性質を兼ね備えたコンクリート。

完全リサイクル住宅：2000 年秋に竣工した我が国初の完全リサイクルコンクリート実構造物。その生産コンセプトとして、住宅建築を都市社会システムの構成原単位として位置づけ、住宅における構成材料の 80%以上をリサイクルすることが可能な設計施工システムを具体化したものである。日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業における「環境負荷の影響評価と軽減」研究推進委員会に設置された「低環境負荷・資源循環型居住システムの社会工学的実験研究」において検討された。

骨材改質処理効果：改質処理骨材を対象に説明される効果であり、骨材の改質処理により骨材回収性の向上が期待できる表面性状が確保される効果。

骨材付着力低減効果：改質処理骨材とマトリックスを対象に説明される効果であり、骨材の改質処理により原骨材とマトリックスの付着力が低減される効果。

骨材界面剥離効果：改質処理骨材を使用したコンクリートを対象に説明される効果であり、骨材の改質処理により原骨材とマトリックスの剥離が容易になる効果。この効果には、水セメント比依存性と骨材粒形依存性があり、そのバランスを制御することで、ひび割れが合理的に骨材界面に回り込み、破壊が延性化するクラックディフレーション効果を導くことが考えられる。なおそのようなコンクリートには、セメントマトリックスが高強度で碎石を使用したコンクリートが該当する。

設計哲学：建築物の設計および生産過程に関して、現在既に一般化されている概念・方法論・プロセス・全体の仕組み等に内在する諸特性を「補強」するのではなく、「検証」する施行を行うこと。

経済活動余命期間：地球の自浄能力が有効に機能しなくなり、その結果、地球温暖化問題さらには地球環境問題が深刻化して経済活動を優先した生活ができなくなるまでの期間。

リサイクルの二大原則：I Recycling should be of high quality. II Recycling should be repeatable. により示される。1998 年にカナダ・オタワで開催された Sustainable Development of Cement and Concrete Industry に関する国際会議にて友澤、野口、田村により投稿された論文の発表に際し、友澤により示された。

関連文献リスト

1. 学術論文・学術雑誌掲載分(1997～2002年)

No.	論文題名	発表誌	巻,号,頁	発表年月	共著者
1	骨材回収型リサイクル指向コンクリートの開発	セメントコンクリート 論文集	No.51 pp.494-499	1998年 3月	友澤 史紀 野口 貴文
2	成分調整不要型完全リサイクルコンクリート開発への一考察	セメントコンクリート 論文集	No.52 pp.1024-1029	1999年 3月	友澤 史紀 野口 貴文 五十畑 達夫
3	石灰石砕砂・粒形改善砕砂を用いた完全リサイクルコンクリートの標準調査と基礎物性	セメントコンクリート 論文集	No.53 pp.899-905	2000年 3月	友澤 史紀 野口 貴文 呉 相均
4	骨材回収型完全リサイクルコンクリートの基礎物性と再生骨材の品質	セメントコンクリート 論文集	No.53 pp.906-911	2000年 3月	友澤 史紀 野口 貴文 呉 相均
5	完全リサイクルコンクリート	建築雑誌	Vo.115 No.1475 pp26-29	2000年 7月	野口 貴文
6	材料保存を基調としたリサイクルコンクリートの提案と実証	コンクリート工学	Vol.38 No.11 pp.29-35	2000年 11月	友澤 史紀 野口 貴文
7	完全リサイクルコンクリートに関する研究	セメント・ コンクリート	No.647 pp.46-53	2001年 1月	友澤 史紀 野口 貴文
8	Concrete Design toward Complete Recycling	Structural Concrete journal of the fib	Volume 2 Number 3 pp.155-167	2001年 9月	野口 貴文
9	特集 再生・リサイクルー循環型社会をめざしてー完全リサイクルを実証するコンクリートデザイン	建築と社会	No.959 pp.22-27	2002年 2月	野口 貴文
10	低品質再生骨材の改質処理による構造体への適用に関する研究	コンクリート工学 年次論文報告集	Vol.24 No.1 pp.1251-1256	2002年 6月	辻 大二郎 野口 貴文
11	骨材回収型リサイクル指向コンクリートの基礎的物性	コンクリート工学 年次論文報告集	Vol.24 No.1 pp.1353-1358	2002年 6月	野口 貴文 橘高 義典
12	Life Cycle Design based on Complete Recycling of Concrete	The First fib Congress 2002－Concrete Structures in the 21st Century－	Vol.2 Session.8 pp.3-4	2002年 10月	野口 貴文 友澤 史紀

2. 口頭発表論文・雑誌記事掲載分(1997～2002年)

No.	論文題名	発表誌	巻,号,頁	発表年月	共著者
1	骨材分離型リサイクル指向コンクリートの開発	セメント技術大会 講演集	第51回 pp.218-219	1997年 5月	友澤 史紀 野口 貴文
2	完全リサイクルコンクリートの実用化に関する研究 その4. 破碎方法の検討と再生骨材の品質および回収率	日本建築学会大会 学術講演梗概集	1997年度 pp.1163-1164	1997年 9月	友澤 史紀 野口 貴文
3	成分調整不要型完全リサイクルコンクリート開発に関する一考察	セメント技術大会 講演集	第52回 pp.426-427	1998年 5月	友澤 史紀 野口 貴文 五十畑達夫
4	資源環境と建設材料	日本学術振興会建設材料76委員会会議論文集	第324回 pp.1-5	1998年 7月	友澤 史紀
5	コンクリートのクローズドリサイクルシステムに関する一考察	日本建築学会大会 学術講演梗概集	1998年度 pp.707-708	1998年 9月	友澤 史紀 野口 貴文
6	Towards Zero-Emissions in Concrete Industry Advanced Technologies for Concrete Recycling	CANMET/ACI Int. Symp. on Sustainable Development of Cement and Concrete -Ottawa-	pp.147-160	1998年 10月	友澤 史紀 野口 貴文
7	石灰石砕砂・粒形改善砕砂を用いた完全リサイクルコンクリートの標準調合と基礎物性	セメント技術大会 講演集	第53回 pp.420-421	1999年 5月	友澤 史紀 野口 貴文 呉 相均
8	骨材回収型完全リサイクルコンクリートの基礎物性と再生骨材の品質	セメント技術大会 講演集	第53回 pp.418-419	1999年 5月	友澤 史紀 野口 貴文 呉 相均
9	完全リサイクルコンクリートの実用化に関する研究 その5. 粒形改善石灰石砕砂を使用したコンクリートの基礎物性と再生骨材の品質	日本建築学会大会 学術講演梗概集	1999年度 pp.285-286	1999年 9月	友澤 史紀 野口 貴文
10	完全リサイクルコンクリートに関する研究	セメント新聞社 セメント新聞	---	2000年 5月	解説記事
11	2000年度セメント協会論文賞受賞よりー完全リサイクルコンクリートに関する研究ー	セメント・コンクリート	No.642 pp.40-46	2000年 8月	友澤 史紀 野口 貴文
12	骨材回収型リサイクル指向コンクリートの実用化に関する研究 その1. コーティング効果とコンクリートの基礎物性	日本建築学会大会 学術講演梗概	2000年度 pp.1039-1040	2000年 9月	野口 貴文 友澤 史紀
13	資源有効活用のリサイクルコンクリート	セメントジャーナル社 コンクリート工業新聞	---	2000年 10月	解説記事
14	日本初の完全リサイクルコンクリート住宅	セメントジャーナル社 コンクリート工業新聞	---	2000年 10月	解説記事
15	テクノロジー最前線, 日本初の施工例となった完全リサイクルコンクリート	日経BP社 日経エコロジー	pp.53-56	2001年 3月	解説記事
16	Development of Recyclable Concrete as an Aid to Resource Conservation	Memoirs of Graduate School of Engineering Tokyo Metropolitan University	No.50 pp.181-188	2001年 4月	野口 貴文 友澤 史紀
17	材料保存を可能とする骨材回収型コンクリートの開発 その1. 定義および骨材の材料保存性	セメント技術大会 講演集	第55回 pp.316-318	2001年 5月	友澤 史紀 野口 貴文

No.	論文題名	発表誌	巻,号,頁	発表年月	共著者
18	材料保存を可能とする骨材回収型コンクリートの開発 その2. コンクリートの基礎物性と破壊特性	セメント技術大会 講演集	第55回 pp.318-320	2001年 5月	土屋 潤 橘高 義典
19	材料保存を可能とする骨材回収型コンクリートの開発 その3. 改質処理効果と骨材回収性能	セメント技術大会 講演集	pp.320-321	2001年 5月	橘高 義典 土屋 潤
20	骨材回収型リサイクル指向コンクリートの実用化に関する研究 その2. コンクリートの基礎物性と破壊特性	日本建築学会大会 学術講演梗概集	pp.735-736	2001年 9月	土屋 潤 橘高 義典
21	骨材回収型リサイクル指向コンクリートの実用化に関する研究 その3. 骨材の改質処理効果を骨材回収性能	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2001年度 pp.737-738	2001年 9月	橘高 義典 土屋 潤
22	Concrete Design toward Complete Recycling	Proceedings of fib int. symp. Concrete and Environment -Berlin-	CD-ROM	2001年 10月	野口 貴文 友澤 史紀 橘高 義典
23	完全リサイクルを実証するコンクリートデザイン その1. 順工程生産システムによる資源循環の形態	セメント技術大会 講演集	第56回 pp.364-365	2002年 5月	野口 貴文
24	完全リサイクルを実証するコンクリートデザイン その2. ライフサイクル設計に包含されるリサイクル設計手法	セメント技術大会 講演集	第56回 pp.366-367	2002年 5月	野口 貴文
25	建築構造物のライフサイクル設計に包含されるコンクリートの材料設計手法 その1. 既存システムから順逆工程統合生産システムへの展開	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2002年度 pp.893-894	2002年 8月	野口 貴文
26	建築構造物のライフサイクル設計に包含されるコンクリートの材料設計手法 その2. ライフサイクル設計の基盤となるリサイクル設計	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2002年度 pp.895-896	2002年 8月	野口 貴文
27	表面改質処理された低品質再生粗骨材を用いた再生コンクリートの基礎物性試験(その1 再生粗骨材製造と表面改質処理方法)	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2002年度	2002年 8月	王 政弘 野口 貴文 兼松 学 辻 大二郎
28	表面改質処理された低品質再生粗骨材を用いた再生コンクリートの基礎物性試験(その2 再生コンクリートの基礎物性)	日本建築学会大会 学術講演梗概集	2002年度	2002年 8月	辻 大二郎 野口 貴文 兼松 学 王 政弘

謝 辭

謝辞

故郷より上京してから育ち始めた庭前にある河津の桜が、早春の訪れとともに芽吹きはじめました。春も間近に迫りつつある 2003 年 3 月、東京大学より小生の学位請求論文「コンクリート構造物のライフサイクル設計における材料保存ストラテジー」に対して博士(工学)の学位を授与していただくに際し、本論文の研究活動に対して適切なご指導および貴重なご助言を賜りました東京大学助教授野口貴文博士に心より感謝申し上げます。名古屋大学学部 4 年生の春に初めて研究室訪問をした際、不学な小生の話を真剣に聞いてくださった上で研究の世界に入り込むための勇気を持つきっかけとなるお言葉を頂き、大きな希望を抱いて東京大学大学院での研究生活を始めることができました。また東京都立大学助手に着任し、研究活動が続いている今日も常に温かく接してくださり、研究面のみならず公私に渡りご指導を賜りました。重ねて御礼申し上げます。そして小生が現在、建築材料と深く関わり合いながら将来を見つめて研究生活を行うことができるのは、北海道大学教授友澤史紀博士(当時東京大学教授)のお陰であります。日々ご多忙の中、終始変わらぬ温かいご指導、数多くのチャンスを賜った一方で、世の中の複雑さやおもしろさなどについても日常の会話を通じて説いて頂きました。研究室に所属して以来、本研究を一貫して継続することができたのも、先生が常に資源循環に関わる問題の奥深さと解決の重要性を問われていたためであります。心より感謝申し上げます。東京大学教授菅原進一博士には、小生が東京大学大学院生として研究活動を開始した頃からご指導を賜るとともに、ご多忙中にも関わらず、論文審査に際し、適切かつ貴重なご助言ならびに温かい激励のお言葉を賜りました。心より御礼申し上げます。論文審査に際し、本論文に対して適切かつ貴重なご助言とご指摘を賜りました東京大学教授野城智也博士、東京大学助教授塩原等博士、東京大学助教授松村秀一博士に厚く御礼申し上げます。また、小生が東京都立大学助手に着任して以来、いつも間近で研究に関する新たな知見や問題点を幅広く示して頂き、研究活動と本論文の完成を激励し続けてくださった東京都立大学教授橘高義典博士に心より感謝申し上げます。さらに小生がコンクリートを中心とした建築材料の研究を志すきっかけを与えて頂き、リサイクルに関わる研究の重要性を説いて、たゆみなく激励のお言葉をかけて頂いた名古屋大学教授谷川恭雄博士、同じく建築材料に関わる研究の楽しさを感じさせて頂いた名古屋大学助教授森博嗣博士に心より感謝申し上げます。また研究活動を激励して頂いた三重大大学教授畑中重光博士に厚く御礼申し上げます。小生が工学院大学兼任講師に着任して以来ご指導を賜り、本論文の完成を応援して頂いた工学院大学教授嵩英雄博士、同じく工学院大学教授阿部道彦博士に厚く御礼申し上げます。

本研究は、循環型社会の構築を目指して世の中が大きく動き始めた時期にまさに実施されたものであり、社会活動を通じて本論文を作成するための数多くの貴重な知見を得ることができました。第 3 章および第 4 章に関しては、Fib Commission 3-Environmental Aspects of Design and Construction of Concrete Structures-における T.G.3.3-Environmental design-の委員会活動において、主査の香川大学教授堺孝司博士、徳島大学教授水口裕之博士、広島大学助教授河合研至博士、土木研究所河野広隆博士、同じく久田真博士(当時新潟大学助教授)ならびに委員各位より貴重なご意見を賜りました。社団法人日本コンクリート工学協会における再生骨材標準化委員会に設けられた発生量 WG(主査:久田真博士)においては、飯田一彦博士(シビルリニューアル)ならびに委員各位より貴重なご意見を賜りました。インバースマニュファクチャリング研究の主導者である東京都立大学助教授梅田靖博士からは、製品生産戦略に関わる貴重なご提案を賜りました。財団法人日本建築センターの新建築技術認証事業における高品質再生骨材認証 WG(主査:友澤史紀当時東京大学教授)ならびに関連する研究活動において、東京理科

大学助教授清水昭之博士、古賀康男氏(宇部三菱セメント研究所)、米澤敏男博士(竹中工務店)、山崎庸行氏(清水建設)、黒田泰弘氏(清水建設)ならびに関係者各位より最新の研究情報に関する知見をお示し頂きました。第5章に関しては、社団法人セメント協会・研究所の建設副産物利用促進専門委員会に設けられた完全リサイクルコンクリートの実用化に関する研究活動から貴重な知見が得られました。成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの実験に関しては、岡本享久博士(太平洋セメント)、山本幸雄氏(当時八洋コンクリートコンサルタント、現日本建築仕上学会)、栄井健二氏(アクセンチュア)、大塩明博士(当時セメント協会・研究所所長)、横山滋氏(太平洋セメント)、五十畑達夫氏(住友大阪セメント)、村田芳樹氏(セメント協会・研究所)、島崎泰氏(セメント協会・研究所)、高橋茂氏(セメント協会・研究所)ならびに関係者各位よりご助言とご協力を賜りました。粒形改善型石灰石砕砂を用いたコンクリートの実験に際しては、浅野研一氏(八洋コンクリートコンサルタント)、金光俊典氏(当時太平洋セメント)、松山歩氏(当時東京大学学部生、現読売広告社)、遠藤和也氏(丸工砂利販売)ならびに関係者各位にご協力を賜りました。完全リサイクルコンクリートの実構造物への施工に際しては、早稲田大学教授尾島俊雄博士および同大学講師中島裕輔博士ならび大学関係者各位より有意義な機会を与えて頂くとともに、立屋敷久志氏(三菱マテリアル)、徳永政利氏(曽根生コンクリート)および施工関係者各位に実務的な段階で多くのご指導とご協力を賜りました。第6章における骨材回収型リサイクル指向コンクリートの実験に際しては、長谷川和男氏(東洋薬化学工業)、土屋潤氏(東京都立大学大学院生)にご協力を賜りました。第7章における生コン製造量に関する基礎情報の収集に関しては、大岡督尚博士(東急建設)にご配慮賜りました。上記で示されるように、本論文は非常に多くの皆様の支えとご協力があって初めて取りまとめることができたものといえます。あらためて感謝申し上げます。

そして、大学院学生時代から現在に至るまで、東京大学技官田村正道氏には研究生生活を充実したものにするためのご助言やご配慮を賜りました。毎日をともに過ごした大学院研究室の先輩である東義大学助教授呉相均博士、同級生の東京大学助手兼松学氏、そして後輩の丸山一平氏(東京大学大学院生)、長井宏憲氏(東京大学大学院生)、辻大二郎氏(竹中工務店)をはじめとする研究室の仲間との何気ない会話や共に研究に励む生活は、研究をつらぬくための原動力になりました。東京都立大学助手着任時に研究室に在籍していた吉岡昌洋氏(長谷工コーポレーション)、松山祐子氏(東京都立大学大学院生)始めとする卒業生および在学生、さらに三重大学助手三島直生博士を始めとする名古屋大学の同級生の皆様がくださった数々の応援の言葉はとても有り難いものでありました。あらためて感謝申し上げます。

私がコンクリートを初めて練ったのは、ものづくりが好きな父親を中心に家族総出で小さなガレージを作り上げた小学生の時分ですが、大学で本格的に建築を学び始めるまでに漠然と築かれていた建築物に対する興味は、少年期の両親による体験の付与が大きく影響していると思われます。そして現在も、様々な問題に対し積極的に検討し、応援をしてくれる家族に対し、この上ない感謝の気持ちを捧げます。

最後に、名古屋大学の学生時代より今日に至るまで、絶えず励ましの言葉と安らぎを与えてくれ、時には真剣に研究内容について議論を交わし、本論文の完成を満面の笑みで讃えてくれた妻 田村順子に心から感謝の言葉を贈るとともに、今後の尽力を誓うものであります。

2003年3月

田村雅紀