

第3章 コンクリートの材料保存性が導く生産システム

3.1 概説

3.2 資源循環の共通言語

3.3 コンクリート構造物の生産システム

3.4 コンクリートのリサイクルシステム

3.5 第3章のまとめ

3.1 概説

コンクリートは建設材料として有用な材料であり、一般にコンクリート構造物の寿命は数十年から百年以上は期待できる。しかし、過去において大量に製造されたコンクリート構造物の多くは、実際に想定した使用期間より相当に短い年数で解体・撤去されてきた。その理由の多くは、デザインの陳腐化および空間更新性の制限ならびに設備機器や材料劣化に起因する構造躯体自身の性能低下などの技術的な問題に求められるといえるが、実際には、新製品の消費を推進し、使用済み製品の再利用を抑制するマーケットメカニズムや、行政による政策的指導等による社会的問題の影響も否めない。次世代においては、構造物のライフサイクルを企画段階で予め想定し最終的に解体処理する段階の手法を考慮した設計手法の導入を前提に、構造物の寿命に影響する社会的要因により構造物の機能寿命が低下する現象も踏まえた技術開発が必要であるといえる。

ライフサイクル設計手法に関しては、機械系の産業分野を中心とした他産業分野で数多く検討されており、1989年に世界に先駆けて提案されたIMS(Intelligent Manufacturing Systems)国際共同研究プログラム[1]や、IM(Inverse Manufacturing)生産システム[2]などの研究活動において、精密機械製品に関するライフサイクル設計の基礎概念や、実証的な設計方法が具体的に提案されている。実際に、一部の製品においては、製造・解体・再資源化を踏まえた製品設計が適用され、廃棄物が殆ど発生しない循環が常態化している事例も存在する。一方、建設業においては、ライフサイクル設計に深く関わる内容として、建築性能の規格化が検討されており、国際的には、建築生産のプロセスにおける企画段階ないし設計または設計・施工の契約段階における問題を扱うものとして、ISO9699-1994「建築性能規格－ブリーフ作成のためのチェックリスト－建築設計ブリーフの内容(Performance Standard in building-Checklist for briefing-Contents of brief for building design)」[3]が示されている。欧米においては、発注者側が建築企画内容を詳細に記述するブリーフを作成することが既に一般化しているという。国内では、日本建築学会において1980年代より、建築物の企画・計画法、ブリーフ(プログラム)に関する様々な研究が実施されており、建築物の性能に関する膨大な研究蓄積を残している。しかしながら、現在のところ実務的な使用には繋がっておらず、生産の初期段階で必要となるライフサイクル設計戦略に関しても具体的な方針は殆ど提示されていない。今後の具体的な運用方策を検討することが重要である[4]としている。その他、2000年には日本建築学会より建物のLCA指針(案)[5]が示されているが、LCAの基本的な性質として、設計終了後に完成した建物に対する性能やサービスを環境側面で評価することが挙げられるため、ライフサイクル設計において有用なツールとするためには、LCAの適用実績を企画設計段階にフィードバックできる仕組みが必要であると思われる。以上からも、日本における建設業においては、ライフサイクル設計と呼ばれる概念形成、更にはその具体的手法の適用性は、未だ発展途上の段階にあるといえよう。

本章ではコンクリート製品のライフサイクルを考慮した設計法に必要な材料法則を導出するために、コンクリート構成材料の資源循環性を確保する観点からコンクリートおよびその構成材料の特徴を整理し、それに基づき新たに構成される生産システム、コンクリート塊の解体・処理方法および生産される再資源化物の性質を明らかにする。続いて、その概念を基に現在発生するコンクリート塊の最適な利用方法を具体的に示し、既存のコンクリート構造物に起因する物質循環の仕組みを明らかにする。

3.2 資源循環の共通言語

コンクリート構造物のライフサイクル設計のあり方を検討する上で、ライフサイクル設計に深く関連する性質を言語化した共通言語を示す。共通言語とする理由は、本章で定義する各種性質の言語は、物質としての安定性を基盤とする建設材料について安定という性質に見出される本質的価値が物質が損なわれないことを条件に循環し続けることであると位置づけ、その本質的価値を共通の尺度として全面的に反映した定義を改めて行っているためである。なおここで示す共通言語は、コンクリート構造物に限らず、製造物を生産する際に深く関連のある ISO 14040、ISO 14041、ISO 14043、ISO 14050、ISO 8930-draft2001、CEN/TC250、Hendriks 2000 Definitions などの公的機関で定義化された言語、もしくは現在一般的な概念となっている環境マネジメントに関わる環境言語[6-12]の内容を考慮した形で定義化している。同時に、日本におけるコンクリート構成材料のマテリアルフローに関する特徴、資源賦存状況およびコンクリート構造物の生産システムなどのあり方を考慮し、最終的に「原料概念」、「循環概念」に関する共通言語として導出した。

原料概念に関する用語

素材 (Raw Material)

「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。」

骨材の場合は、「将来的にコンクリートの骨材になりうる物質で構成され、骨材とすることを目的とした破碎・粒度調整等の処理が施される直前の物質群」と説明される。

材料 (Resource)

「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。」

骨材の場合は、「コンクリートにおける骨材のことであり、骨材となるために破碎・粒度調整等の処理を施した物質である。コンクリートに取り込まれた状態においても、骨材の品質は維持されており、コンクリートの性能が確保される。」と説明される。

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。

骨材の場合は、「再生骨材コンクリートにおける再生骨材のことであり、再生骨材製品となるために、目標とする破碎・粒度調整等の処理が施されている。再生骨材コンクリートに取り込まれた状態では、再生骨材の品質の保持は考慮されず、用途が限定された再生骨材コンクリートとしての性能が確保される。」と説明される。

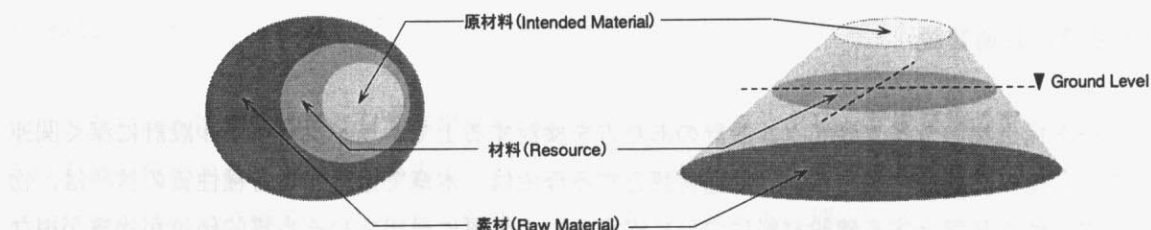


図 3.2.1 素材－材料－原材料の位置づけ

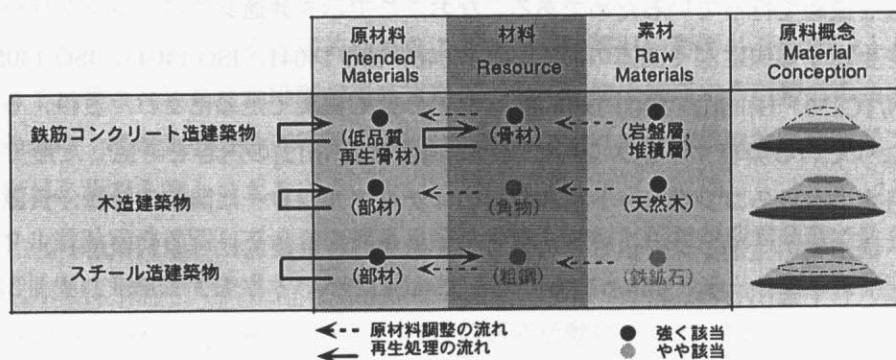


図 3.2.2 建築構造物における素材－材料－原材料の位置づけ

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

骨材の場合は、「コンクリートに用いられた骨材が、コンクリートの解体分離後に品質の低下を生じないまま、同程度以上の性能を有するコンクリートの骨材として使用可能な状態が維持されており、コンクリートを媒体として骨材が循環し続ける性質」と説明され、その導入方策が材料保存ストラテジーとなる。図 3.2.2 に各種建築物における素材－材料－原材料の位置づけを示す。鉄筋コンクリート造建築物は生産工程に構成材料を材料(Resource)として扱うことを可能とする段階が明確に存在するため、材料保存性が確保される条件が予め整備された建築物であるといえる。

循環形態に関する用語

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、製品の品質・性能の低下を許容し、材料保存性が確保されない形で更新する形態(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、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(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、製品自身もしくは部品の更新を行なう場合に、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ような循環の形態

クローズドループ (Closed Loop)

製品が使用限度に到達し、製品自身もしくは部品の更新を行なう場合に、廃棄要素もしくは新規投入要素の発生がなく、循環領域が拡大しないような循環の形態

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处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。各々は前処理ゼロエミッションと後処理ゼロエミッションとして説明される。

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



図 3.2.3 ダウンサイクルとレベルサイクルを包含するリサイクルの位置づけ

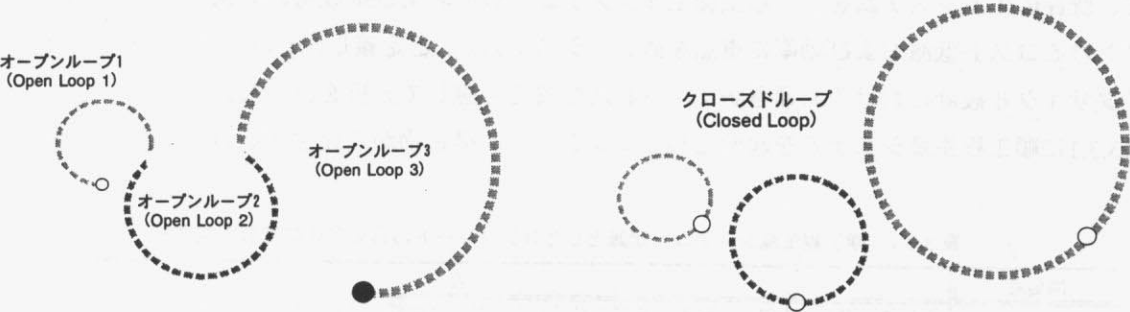


図 3.2.4 オープンループとクローズドループ

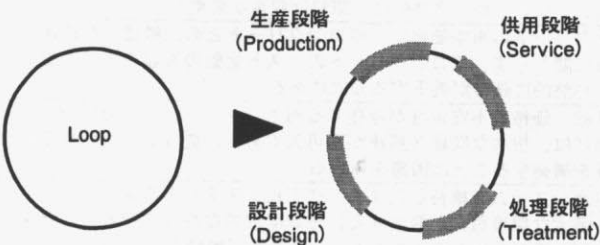


図 3.2.5 材料保存性を前提としたライフサイクル

3.3 コンクリート構造物の生産システム

3.3.1 順工程生産システムの限界性

新規のコンクリート構造物に対し、ライフサイクル設計の導入を試みるにあたり、ライフサイクル設計が導入されていない既存のコンクリート構造物について、コンクリート塊の処理方法、発生物質および再資源化物質の適用性を分析し、その結果を導く生産システムの特性を明確にすることは重要である。

平成12年度建設副産物実態調査結果によると、鉄筋コンクリート造建築物を中心として発生するコンクリート塊は、その4%が廃棄処分され、残りの96%が再資源化されている[13]。しかし、その主用途は道路用路盤材となる再生砕石が中心であり、バージン材に対して要求される品質よりも低下することが許容され、材料保存性が確保できないダウンサイクルの更新形態を導いているといえる。従って、現在は、ダウンサイクルを導く構造物ストックを膨大に保持し、かつ同様の性質を持つ構造物を、再び生産する体系を、引き続き維持するような状況下になると説明できる。

一方、新規コンクリート構造物に使用される天然骨材および砕石等の人工骨材であるバージン骨材資源の需用は、1970年代初頭より激増してきたが、昨今は人口の自然減に起因するコンクリート生産量の低下現象により、骨材需要量についても低下する傾向にある。しかし、その量自体は相変わらず膨大であり、資源枯渇問題が緊急性を帯びる状況は今後も続くものと思われる[14-16]。以上より、ダウンサイクルによる更新形態に偏重した現状の処理・再利用体系を維持した状態で、新規コンクリート構造物に対し、バージン資源を供給する仕組みを継続することは極めて困難である。このように、生産における上流と下流の物質循環の流れが首尾一貫しない生産システムは、循環型社会における製品生産システム構築のための基本理念[17]からも大きく逸脱するものと認識できるため、現状の生産システムを維持したままコンクリート産業の持続可能な発展を期待することは困難であると考えられる。

以上より、本章では新規コンクリート構造物に対し、ライフサイクル設計を運用可能にする新しい生産システムと、高度成長期から継続されている既存の生産システムとの差別化を図ることを前提条件として、既存の生産システムを、「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）」と定義し、そのシステムが有する特徴を、ライフサイクル設計における共通言語で示された性質を考慮して分析を行った。

表3.3.1に順工程生産システムを起源としたコンクリート構造物から発生するコンクリート塊を、同一

表 3.3.1 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、原料回収量が変動し、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。

製品(再生コンクリート)として再資源化する際に発生する諸問題の分析結果を示す。再生品を生産する上で重要となる「品質」「供給量」「価格」「流通システム」および「環境負荷」の5項目の基礎的性質に対する問題点の分析を行った。結果全般を通じて、従来型の再利用方法には、循環使用をする上で、明らかに問題となる要因が存在しており、再生コンクリートをリサイクル製品として運用するためには、原因療法的な対策を講じる必要があることが明確にされた。なお市場において、リサイクル製品をバージン資源製品よりも優位に立たせるためには、上記の基本的性質以外にも、更に多くの要因に対する問題解決のための予防策を予め講じる必要がある[18]とする意見もある。

一方、再生骨材を用いたコンクリートの標準情報TR A 0006を基に、最終的にJIS規格化して実務的な使用を可能にする動向[19]があるが、政府における全国道路整備計画案などによると、将来的には道路用路盤材の需要量は低下すること[20]なども表明されている。以上より、再生骨材を出来るだけコンクリートの原材料として使用して、物質の循環系を拡大させないようにする努力義務が必要であると思われるが、低品質再生骨材コンクリートにより、その実現可能性を期待することは現状の生産システムにおいては困難であり、更なる方策が必要とあることが明らかになった。

3.3.2 順逆工程統合生産システムの基礎的性質

順工程生産システムから脱却し、新しい生産システムを構築する方策を具体化する。まず、新たな方策を導出するための必要条件として、現在の生産システムが「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」として定義化される順工程生産システムであったことを再認識する必要がある。続いて、順工程生産システムとは相違する新しい発想を展開するために、順工程生産システムの逆概念を単純に文章化すると、「製品および構成材料の易分解性を考慮して、生産におけるコスト低減および効率のみを過大評価しないシステム」となる。この逆概念は、順工程の合理化と効率化に重点を置いた現状の生産体系からは、全く想定されなかいものであることが理解できる。つまり、この概念により生み出される状況は、新たな環境側面を生み出すものと捉えられる。ちなみに、このような従来の仕組みを見直すための発想の創起・転換は、例えば高度成長期における圧倒的な生産性を生み出した社会背景において、結果的に、人間に甚大な被害を与えることになる公害の発生が予め予想できなかったという過去の生産・社会システムのあり方に対する危惧が発端になり導出されるものとも説明できる。つまり、地球環境問題と称して様々な警鐘が表面化している現在においても、その問題を引き起こしている原因というものが、現在一般化している生産行為に内在し、公害問題と同様に、近い将来において人間に対し甚大な被害を与えかねないという不安感により、その仕組みの再構成・見直しに基づいて新たな方向性を導出しているのである。なお現在は、建設業に限らず他産業分野を含め、過去において構築してきた順工程生産システムというものが、将来的に引き起こす甚大な害悪というものは、最終的には地球温暖化問題に集約される性質を持つものと思われる。

ここで、順工程生産システムの逆概念となる建築構造物に関する生産システムの性質を定義化する。まず他産業分野における製品と相違する建築物の特徴を示すと、建築物は、柱・はり・壁・床・屋根などの複数部材の集合体であり、建築物の性能設計をする際には、その構成要素である部材・材料・素材は「物質性能」に置き換えられると考えられる。そして、素材という最小構成要素から材料・部材・さらには建築物を構築するためには、製造・施工という人為的な作業・行為が発生するのであるが、これらは「形而上的性能」として置き換えが可能になる[21]としている。従って、建築物は「原料を加工し

て商品化する製品」[22]の範疇には該当するものではなく、建築物として竣工するまでの、「契約、設計、施工、管理などの工程を積み重ねて得られる生産物」[22]として位置づけられる。従って、目標とする「物質性能」と「形而上的性能」を同時に充足することで初めて生産物として誕生するものと捉えられる。以上より、建築物、さらにはコンクリート構造物の生産システムを検討する場合には、生産工程における主要な「形而上的性能」となる組立性および分解性のあり方および、組立や分解の対象となる物質自身の性質について検討することが、本質的に求められる条件のひとつとなる。

形而上的性能に位置づけられるコンクリート構造物の分解性について検討する。現在、建設リサイクル法などの個別リサイクル法による法整備の効果もあり、コンクリート塊というものは、廃棄しないで再資源化するということが一般的な認識となっている。そして、将来的な建築物の生産工程は、「ゆりかごから墓場まで」の順工程の生産工程に加え、分解性に関わる解体処理以降の再資源化工程を含めたものとして認識する必要があるといえる。従って、構造物用コンクリートにおける易分解性を確保した構造物の形而上的性能を考える場合には、組立工程と分解工程を同時に扱うことが原則となる。

分解組立性設計の研究分野における共存設計最小化[23]の考え方を応用を試みる。共存設計最小化の概念とは、製品および生産物における分解性と組立性は、製品のライフサイクルの各所で、その検討可能性は繰り返し発生するものとして捉えられ、分解と組立の双方の状態に着目することが必要であるとしており、共通する設計部分（分解性と組立性の設計が比例の関係にあり、分解性容易設計を行うと組立性も容易になる設計）と、相反する設計（分解性と組立性の設計が反比例の関係にあり、分解性(組立性)の容易な設計を行うと組立性(分解性)が困難になる設計）があることを前提に、分解性、組立性のともに効果のある「共通する設計部分」を最大限に製品設計に導入し、逆に相反する部分が共存する範囲を最小限にする設計法である。構造物用コンクリートの易分解性を合理的に確保するためには、材料設計の段階で、最終的な分離対象となる骨材部分とセメント原料部分に関して、骨材に対しては、組立性を適度に保持しつつ分解性を向上させるように共通部分の増大化を図ること、セメントに対しては、セメント原料化する成分を多く導入し、分解対象にその成分が多く含有するように共通部分の増大化を図ることが検討可能な手法として位置づけられるのである。

以上の内容を踏まえて、順工程生産システムの逆概念を定義化すると、「同一システムの組立性・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」となり、これを「順逆工程統合生産システム」として位置づける。

図3.3.1に順逆工程の統合化概念モデルを示す。従来型の構造物における「a)順工程生産システム」

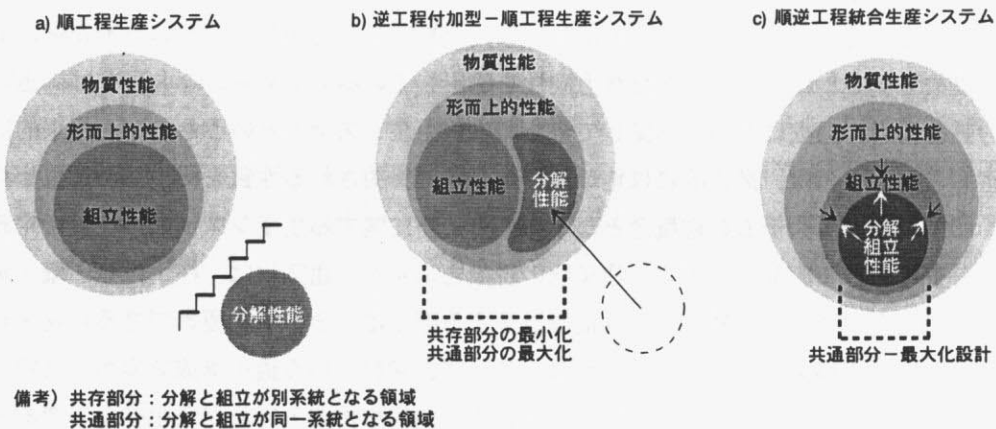


図3.3.1 順逆工程の統合化概念モデル

では、部材および材料の分解性が考慮されないため、形而上的性能に分解性能は包含されない図式となる。現在一般化している既存構造物を対象としたリサイクルシステムを含む「b)逆工程付加型一順工程生産システム」では、企画段階で考慮していない分解性を、形而上的性能として付加するため、エネルギー的な負荷を許容した上で高度処理製造装置[24-25]などにより、骨材とペーストとの分解性を確保し、再生品を製造する図式となる。そして「c)順逆工程統合生産システム」では、企画段階で骨材とペーストとの分解性を予め確保するため、共通部分である分解組立性能が生み出され、それを実現する手法・技術の最適なあり方を検討することが具体的に可能になる図式となる。

図3.3.2に、3種類の建築生産システムのライフサイクルを示す。「旧来の建築物」における順工程生産システム、「現在の建築物」に一般的である逆工程付加型一順工程生産システムおよび「将来の建築物」における順逆工程統合生産システムに関して、建築物の第1世代から第2世代にわたる資材段階、生産・使用段階および処理・処分段階における構成材料や生産システムの流れを示す。「旧来の建築物」は、資材段階で構成材料の材料保存性は考慮されていないため、天然資源は、第1世代のみのコンクリート構成材料として使用される原材料として位置づけられる。生産の合理化とコスト削減が最優先される結果、コンクリート塊は廃棄処分され、第2世代では再び天然資源を大量投入して構造物が生産される図式となる。「現在の建築物」は、生産使用段階までは旧来の建築物と同様であるが、解体処理段階で、再生骨材の高度処理装置を使用し、エネルギー的な負荷を許容した上で、バージン資源が回収される。しかし、構成材料の分解性は考慮されていないため、再生材料の品質および回収性は十分なものではなく、第2世代では一定のコンクリート性能を得るために不足分となる天然資源を再投入して構造物が生産される図式となる。「将来の建築物」は、コンクリート構成材料の材料保存性を確保するため、天然資源はコンクリート中で組成が変化しないまま保存され、解体後はその全量が品質低下を引き起こさない状態で分解・回収され、再び天然資源として構造物に使用することを可能にする図式となる。

以上、順逆工程統合生産システムの定義と、建築生産システム群のライフサイクルについて分析した。順工程生産システムは、確かに、短期間で構造物を生産する技術を飛躍的に向上させ、大量の構造物を供給する状況を生み出すことに成功したといえる。しかし、近年は順工程生産システムによる構造物では、長期に渡り構造的・機能的な充足感を保持することの困難性と、低コストで合理性を追求する生産システムに対する矛盾点・問題点が意識されるようになってきた。原因は、順工程生産システムが「資源の有限性」を前提とした上で「コストと品質」を両立する技術開発を行なう意識が欠如していたためといえる。現在、建設業の実務レベルでは、地球環境問題を解消する手段として、従来型の生産システムを維持しつつ、逆工程を付加するシステムを一般化する傾向があるが、今回の分析によると、この場合、悪循環を引き起こす構造物を生産し続けながら、エネルギー負荷を許容してコンクリート塊の再資源化を実行することになるため、既にその生産システムには限界性が示されているといえる。

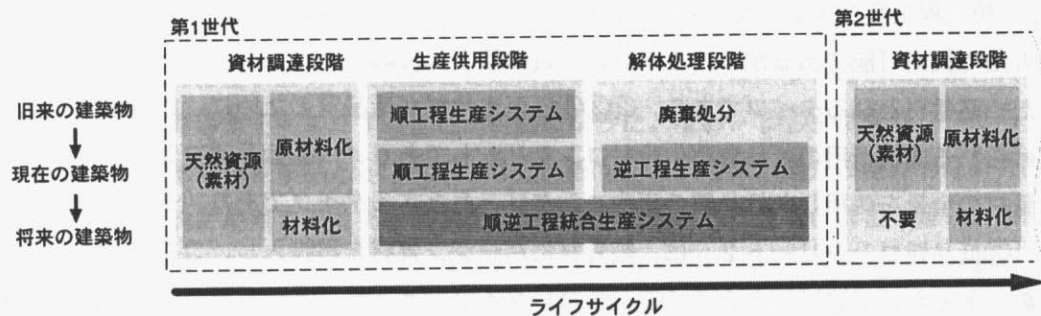


図3.3.2 建築生産システム群のライフサイクル

3.4 コンクリートのリサイクルシステム

3.4.1 順工程生産システムにおけるリサイクルテクノロジー

新規コンクリート構造物に対するライフサイクル設計を導入するための手法の提案と同時に、今後、既存コンクリート構造物から発生する膨大な量のコンクリート塊に対する処理方法のあり方についても、緊急性を帯びた問題として重要視する必要がある。本節では、同問題に対する解決方法を具体的に示す。

前節までの検討により、現在主流であるコンクリートのリサイクル技術[26-27]は、順工程生産システムに基づく構造物を対象とした技術となる。従って、完全に構成材料を再資源化することは困難であり、必然的に対処療法的な手法として位置づけられる。現在においても、原因療法的な手法が具体化されていないことを考慮すると、それは、広い産業領域に物質が拡散し、ダウンサイクル化を繰り返す循環形態を構成する性質を保持しているといえる。なお、このようなリサイクル技術は、企画設計の段階でリサイクルを考慮していない使用済み品を再生する概念に基づくと捉える場合、「コンクリート塊を処理する代替手段」としてリサイクルを行っているという説明も可能になるといえる。

上記内容を踏まえた上で、順工程生産システムに基づいたコンクリートのリサイクル技術に関する整理と分類を行う。この分類は、順工程生産システムに加え、逆工程付加型の順工程生産システムにおける処理技術についても考慮しているため、現時点でのコンクリートのリサイクル技術に関する総合的分類として捉えることが可能になる。なお、分類の前提条件として、順工程生産システムを起源として発生した再生品も、その用途が広範に存在し、かつ要求品質が低い場合には、需要が消失するまでの一定の期間は効果的な手段として機能するものと捉えるとする。コンクリート塊を路盤材として適用する方法に関しては、国土交通省道路局が示す道路整備の調査資料[28]から判断すると、高規格幹線道路の目標総延長距離 15000km のうち、平成 13 年度供用延長距離は 8000km 程度であり、整備計画上是将来的にも一定の需用が期待できるといえる。国土交通省の社会資本整備審議会では、2002 年の時点で国内の道路は一定の量的ストックを満たしたことを公式に認めるとした見解[20]を示しているが、本研究では路盤材用再生碎石としてのリサイクルは、効果的な手段として一定期間は機能するものと捉え、総合的分類に含めて考えることとした。

図 3.4.1 に順工程生産システムを起源としたコンクリート塊の再資源化方法を示す。コンクリート塊の処理方法決定プロセスは、コンクリート塊の発生地域における最終処分場の有無、対象構造物の生産システムにおける順逆工程生産システムの有無、対象構造物用の解体処理費用の有無など、全 8 項目の判断指標により方向づけがなされ、ダイアグラムのフローチャートに従い判定を繰り返すことで、最終的に 6 種類の再資源化手法が選定できるというものである。

表 3.4.1 に順工程生産システムを起源とした再生コンクリートの分類を示す。「①再生碎石」は、一般的な破碎方法で製造可能であるが、再生骨材の品質は低下しており、コンクリート材料として使用が困難であるため路盤材となるタイプである。②③④は再生骨材が低品質のために、設計強度の上限や用途制限が設けられる非構造物の低品質再生骨材コンクリートであり、「②低品質コンクリート 1」は、低品質再生骨材の全量を使用した低品質の再生コンクリートとするタイプであり、その用途が大きく制限される。「③低品質コンクリート 2」は、細骨材にバージン骨材を再投入し、コンクリートの品質向上を図るものであるが、用途は②と大きく変わらないタイプである。「④低品質コンクリート 3」は、一般的な破碎装置により処理回数を高めて高品質の再生粗骨材を回収するものであるが、再生細骨材の

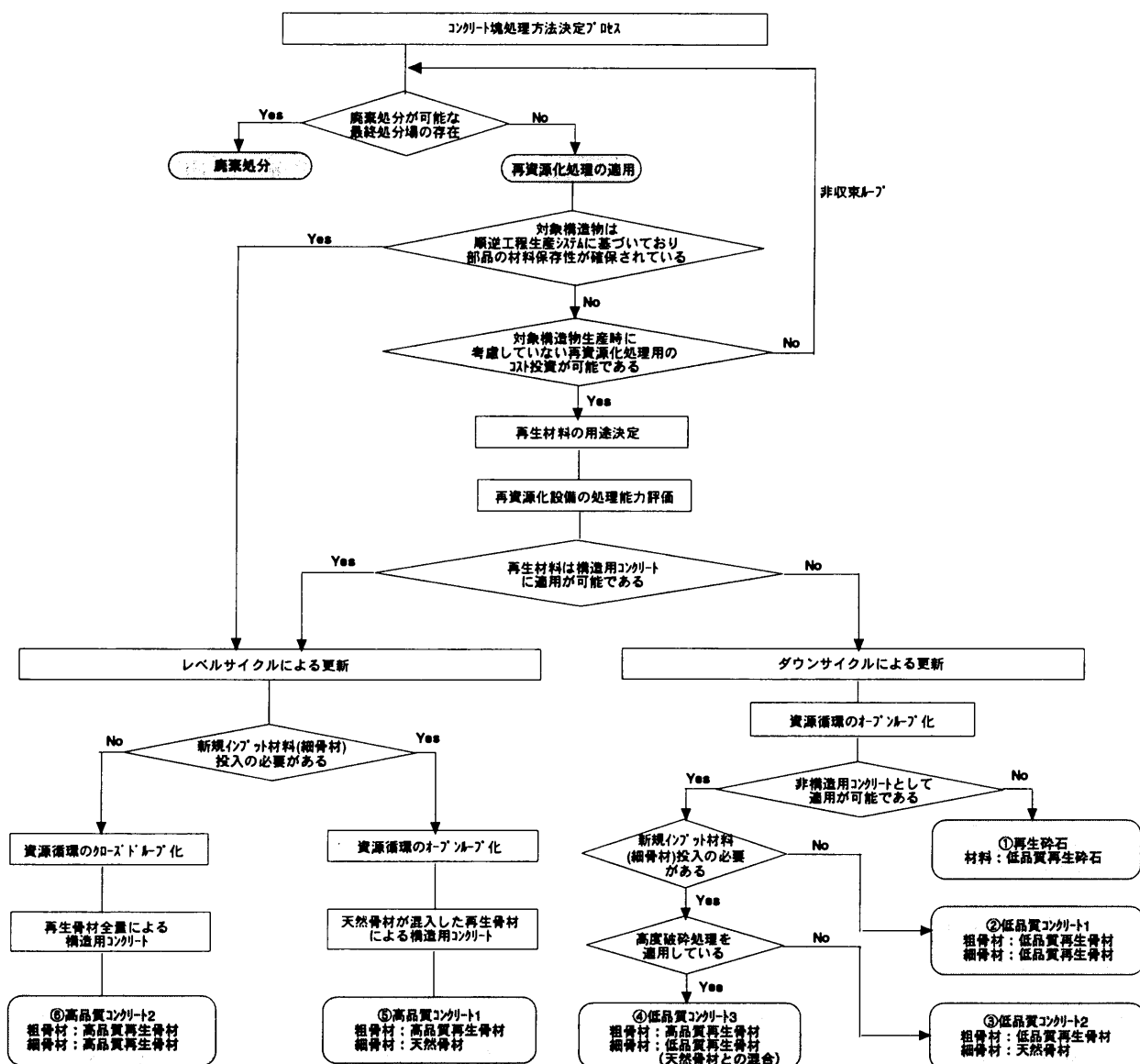


図3.4.1 順工程生産システムにおけるコンクリート塊の再資源化方法

品質は改善されず構造用コンクリートとして使用されないタイプである。⑤⑥は天然骨材と同等の再生骨材とした構造用の高品質再生骨材コンクリートであり、「⑤高品質コンクリート1」は、高度処理により高品質の再生粗骨材を回収するものであるが、再生細骨材の品質は改善されないため、天然骨材を混入して構造用コンクリートとして使用するタイプである。「⑥高品質コンクリート2」は、高度処理により全再生骨材を高品質化し、構造用コンクリートとして使用するタイプである。

以上により、順工程生産システムを起源とした再生コンクリートは、全6種類に分類され、それぞれの更新形態および循環形態を明確にすることが可能になった。なお、②③④は原コンクリートと比較して、その品質が低下する再生製品として位置づけられるが、これらは、過去の精力的な研究開発[29-31]にも関わらず、実務的に使用された実績は少なく、市場性を獲得した技術とは言い難い。原因は、順工程生産システムシステムを起源としたコンクリート塊の再資源化に関わる問題に対する認識不足と、社会的ニーズを十分に捉えていない段階で、品質低下が予想される再生コンクリートを大量に製品化しようとした点に求められる。⑤⑥に関しては、原子力発電所の閉炉措置に伴う、躯体の解体により大量に

表3.4.1 順工程生産システムを起源としたコンクリート塊再資源化製品の分類

循環形態	更新形態	製品レベル	再生骨材の品質		適用概要					
			粗骨材	細骨材	構造材	非構造材	充填材	再生処理	用途事例	需給地関係
オープン ループ	ダウン サイクル	①再生 砕石	低品質 骨材	低品質 骨材	×	×	○	---	非高架新規道 路用路盤材	遠隔
		②低品質 コンクリート1	低品質 骨材	低品質 骨材	×	○	△	---	捨てコンクリート 土間コンクリート 裏込コンクリート等	---
		③低品質 コンクリート2	低品質 骨材	(天然 骨材)	×	○	△	---	コンクリートブロック 重力式擁壁 砂防ダム	---
		④低品質 コンクリート3	高品質 骨材	低品質 骨材	×	○	△	---	コンクリートブロック 重力式擁壁 砂防ダム	---
クローズド ループ	レベル サイクル	⑤高品質 コンクリート1	高品質 骨材	(天然 骨材)	○	○	△	高度処理 (機械破りもみ)	鉄筋コンクリート造 構造物	近郊
		⑥高品質 コンクリート2	高品質 骨材	高品質 骨材	○	○	△	高度処理 (加熱破りもみ)	鉄筋コンクリート造 構造物	近郊

備考) コンクリート塊は人口過密地区で発生すると仮定

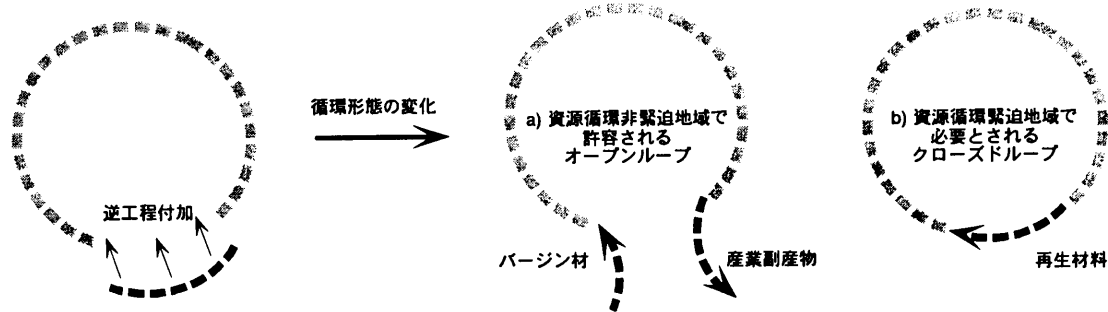


図3.4.2 逆工程付加型－順工程生産システムにおける前提条件

発生するコンクリート塊の利用[32]を背景に開発された技術であり、コンクリート塊を予め構造用コンクリートの材料として使用することが目的とした。結果、目標とする品質を有する再生骨材の製造が可能となり、構造用再生骨材コンクリートとしての新たな活路を見出すに至ったものの、再生骨材製造時に過大なエネルギーを要する点への解決策を検討する必要性が強調されている[33]。

なお現在、実務的使用が検討されつつある②③④に該当する低品質再生骨材コンクリートが有する問題点として、適用可能用途に十分な品質を保証することが困難な構造用コンクリートを含めた提案をしている点が挙げられる。結果、処理レベル、製品レベル、用途基準、価格設定等の要因で一般的な構造コンクリートよりも性能低下することが明確になり、需要増が期待できない結果を導いている。一方、図 3.4.2 で示すように逆工程付加型－順工程生産システムの成立には当該地域における社会的ニーズの適合性を満足する必要がある。例えば、最終処分問題のない資源循環の非緊迫地域では、逆工程コストが最終処分コストよりも高価となる結果、最終処分もしくは後処理ゼロエミッション化を実施した上でバージン材を再投入することが社会的ニーズを捉えた適当な方法となるが、最終処分に問題がある資源循環の緊迫地域では、再資源化コストの程度に関わらずクローズドループによる循環形態を確保する必要性が発生する。つまり、昨今の逆工程処理方法は前者が一般化しているのであるが、例えば都市部においてクローズドループによる循環が必要とされる資源循環緊迫地域においては、逆工程コストが過

大になった場合においても最終処分は避ける必要があるために、後者の循環手法を選定することが不可欠になると考えられるのである。

低品質再生骨材コンクリートを始め、順工程生産システムに起因するコンクリート塊を原料とした再生品を有効に活用していくためには、再生品の品質に合致する用途、製造方法、循環および更新目標を明確にすることが重要であるといえる。また再資源化技術の適性を評価するためには、前提として必要となる生産システムのあり方およびその中で適用される技術自身の目標の定め方を明確にすることが重要となる。そのような意味で、本分類は地域ニーズに影響する資源循環の緊迫性および非緊迫性の要因と既存生産システムの問題点を考慮した上で再生品の位置づけ・用途を決定しているため、既存コンクリート塊を原料とした再生品の BAT(Best Available Technology)[34]を導出する基礎情報になると考えられる。なおこれらのデータを基に BAT が導出された後の展開として、過大なコスト発生がないことを条件とした最適な技術を選定する BATNEEC (Best Available Techniques not entailing excessive costs)[35]のあり方についても検討することが可能になると考えられる。

3.4.2 順工程生産システムにおけるマテリアルフロー

既存コンクリート構造物から発生するコンクリート塊の処理方法および再生材料の分類が明確になったため、それらにより構成される全体的なマテリアルフローを把握することが可能になる。

図 3.4.3 に順工程生産システムに起因する構造用コンクリートのマテリアルフローを示す。これらは三環状のループにより構成され、内環から「構造用コンクリート」、「非構造用コンクリート」、「非コンクリート系材料」の領域で構成される。

左上段に示される「構造用コンクリート」の領域では、コンクリート塊を原料に、高度破碎処理により分類⑤⑥の高品質コンクリートが製造される。⑥に関しては、骨材の全量をコンクリート塊から賄うことが可能であり、コンクリート構造物のみで資源循環を図るクローズドループの構築が期待できるが、加熱処理による熱エネルギーの環境負荷を考慮する必要がある。⑤に関しては、バージン細骨材を再投入してコンクリートとする必要がある。従って、分類⑤⑥をまとめた循環形態は、結果的にオープンループとなり、外環の領域にコンクリート塊がダウンサイクルされるようになる。

右上段に示される「非構造用コンクリート」の領域では、上位である構造用コンクリートを起源とした破碎物や、「非構造用コンクリート」自身から発生するコンクリート塊を原料に、一般的な破碎処理により分類②③④の低品質コンクリートが製造される。各種とも、「非構造用コンクリート」となるために、天然資源の再投入や、低品質再生骨材の大量発生が起こるためにオープンループとなり、外環の領域にコンクリート塊が大量にダウンサイクルされる循環形態となる。

下段に示される「非コンクリート系材料」の領域では、上位である「非構造用コンクリート」を起源とした破碎物や、「非コンクリート系材料」自身から発生する再生碎石を原料に、一般的な破碎処理により、分類①の再生碎石が製造される。再生碎石を路盤材等に使用する場合は、天然資源の再投入は少ないが、供給量が過剰になり余剰分が発生する可能性がある。また密度の小さい再生碎石は、用途が限定され、最終的に廃棄処分される傾向になるため、廃棄型のアウトプットが大量に生み出し、環境破壊を増進させる循環形態であるといえる。

以上により、順工程生産システムに起因する構造用コンクリートのマテリアルフローの全体形の特徴が説明することが可能になる。

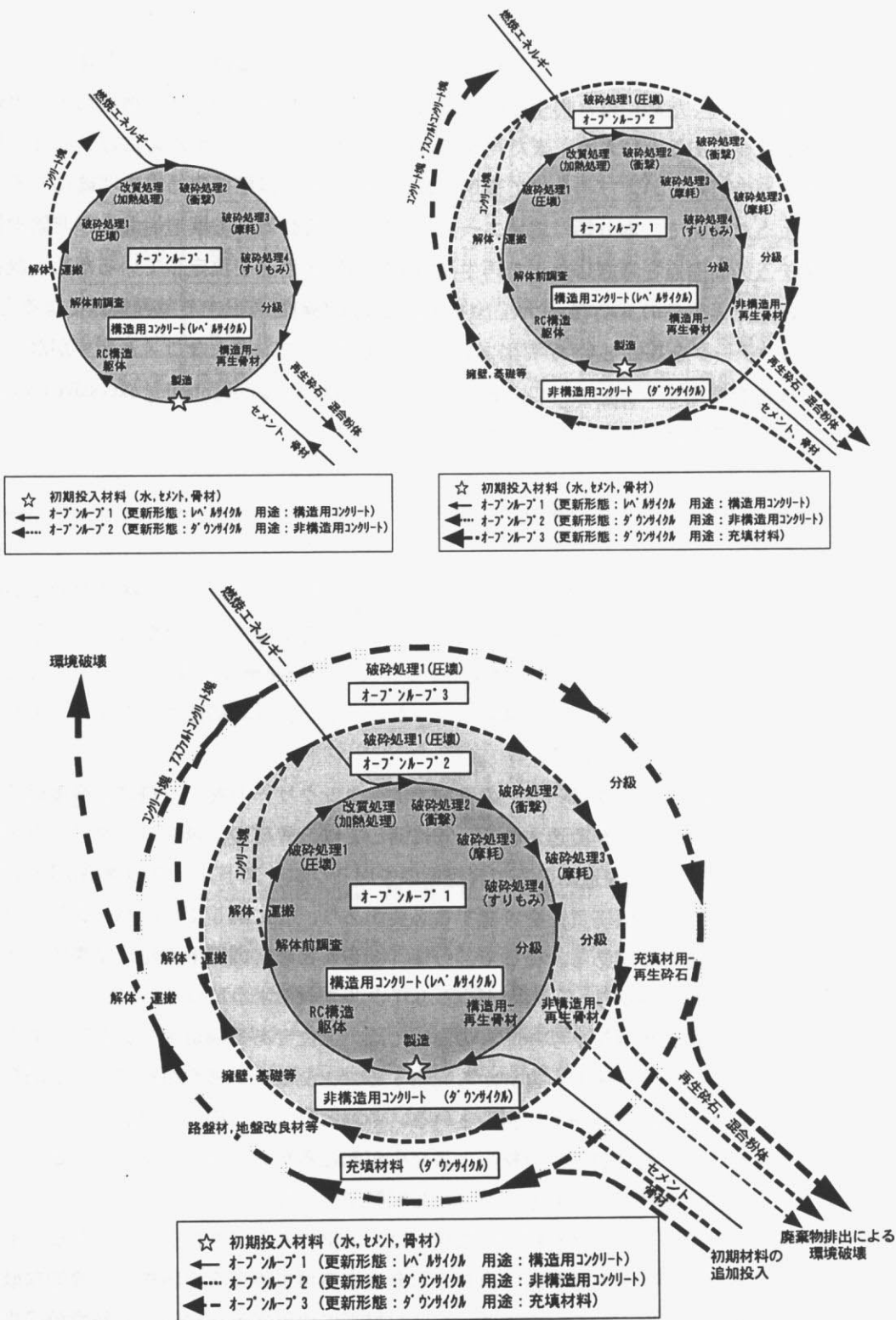


図 3.4.3 順工程生産システムに起因する構造用コンクリートのマテリアルフロー

3.5 第3章のまとめ

本章では、新規コンクリート構造物のライフサイクル設計法に必要な材料法則を導出するために、コンクリート構成材料のライフサイクルを考慮した材料特性を整理し、既存の生産システム、既存のリサイクル技術、既存のコンクリート構造物によるマテリアルフローの形態の仕組みについて検討した。以下に得られた知見を示す。

- 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、構造物の更新形態を整理する必要がある。
- 2) コンクリート構造物の生産システムには、順工程生産システム、逆工程付加型一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、逆工程付加型一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碎石、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、クローズドループとはならず、三環状のオープンループを形成する。

第3章の参考文献

- [1] 吉川弘之：テクノグローブ,工業調査会,1993
- [2] 梅田靖：インパースマニユファクチャリングーライフサイクル戦略への挑戦ー,工業調査会,1998
- [3] ISO9699-1994,Performance Standard in building-Checklist for briefing-Contents of brief for building design
- [4] 友澤史紀：建築設計ブリーフの役割と効用ー発注者はどのような建築をたてようとするのかー,日本建築学会建築設計ブリーフ特別研究委員会,日本建築学会大会研究協議会資料,2001
- [5] 建物のLCA指針(案)ー地球温暖化防止のためのLCCO2を中心としてー,日本建築学会,1999
- [6] ISO14040-97 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework
- [7] ISO14041-98 Environmental management - Life cycle assessment - Goal and scope definition and inventory analysis
- [8] ISO14043-00 Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle interpretation
- [9] ISO14050-98 Environmental management - Vocabulary
- [10] ISO 8930-87 General principles on reliability for structures - List of equivalent terms
- [11] CEN/TC 250, Structural Eurocodes
- [12] Hendriks Ch.F.: Durable and sustainable construction materials, Aeneas 2000
- [13] 建設副産物リサイクル広報推進会議編：総合的建設副産物対策,平成 12 年度建設副産物実態調査結果,2000
- [14] 江良誠至：碎石,コンクリート工学,vol.34,No.7,pp.18-24,1996
- [15] 阿部道彦：コンクリート用骨材の課題,コンクリート工学,vol.34,No.7,pp.4-5,1996
- [16] 岩田誠二：わが国における骨材需要の推移と資源調査の現状,セメントコンクリート,No.415,pp.6-13,1981
- [17] 循環型社会白書：平成 13 年度循環型社会の形成の状況に関する年次報告及び平成 14 年度において講じようとする循環型社会の形成に関する施策,2002
- [18] 武田邦彦：リサイクル汚染列島ー環境にも身体にも悪いリサイクル社会の危険性とはー,青春出版社,2000
- [19] 辻幸和,河野広隆：再生骨材を用いたコンクリートの標準情報 TR A 0006,建設リサイクル,Vol.16,pp.28-33,2001
- [20] 国土交通省：社会資本基盤審議会中間報告書,2002
- [21] 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,特集・コンクリート構造物の長寿命化,コンクリート工学,Vol.40,No.5,2002
- [22] 建築学用語辞典,日本建築学会,1999
- [23] 山際康之,岩田修一,桐山孝司：分解性と組立性が共存するための設計法の研究,エコデザイン 1999 ジャパンシンポジウム論文集,pp.92-95,1999
- [24] Shima, H., Tateyashiki, H., et al., New Technology for Recovering High Quality Aggregate from Demolished Concrete Proc. of the Fifth Int. Symp.on East Asian Recycling Tech., The Mining and Materials Processing Institute in Japan, pp.106-109, 1999
- [25] 柳橋邦生,小島正朗,神山行男,米沢敏男：高品質再生コンクリートの研究ーフレッシュコンクリートの経時変化と実構造物への適用ー,日本建築学会学術講演梗概集 A-1,pp.1043-1044,2000
- [26] 長岡茂徳：再生骨材の製造技術の現状と今後の展望,骨材資源工学会,1996
- [27] 石倉武,友澤史紀,他：高品質再生骨材の製造技術に関する開発,日本建築学会学術講演集, pp.1094-1096, 1995
- [28] 国土交通省道路局：日本の道路暮らしと産業の道作り,2002
- [29] 建設事業への廃棄物利用技術の開発委員会 土木構造物分科会：廃棄物の建設事業への利用可能性に関する調査報告書,(財)国土開発技術研究センター,1983
- [30] 建設省：建設技術総合開発プロジェクト,建設副産物の発生抑制・再生利用技術の開発報告書,1996
- [31] コンクリートへのリサイクル資材活用技術の標準化に関する調査研究委員会：エコセメントの標準情報 TRおよび再生骨材を用いたコンクリートのTRの概要,コンクリート工学,Vol.39,No.11,pp.53-59,2001
- [32] 石倉武,最首貞典,助清満昭,友澤史紀：高品質再生骨材製造技術の開発,コンクリート工学,Vol.37,No. 7, pp.16-23,1999
- [33] 島裕和,立屋敷久志,橋本光一,西村祐介：加熱すりもみ法によるコンクリート塊からの高品質骨材回収のLCA評価,コンクリート工学年次論文集,Vo.23,No.2,pp.67-72,2001