

第4章 コンクリート構造物のライフサイクル設計手法

4.1 概説

4.2 ライフサイクル設計のコンセプト

4.3 ライフサイクル設計の実装

4.4 第4章のまとめ

4.1 概説

コンクリート構造物におけるライフサイクル設計手法を導入するためのイドライン、ツールなどの存在は明らかではなく、その概念自体、明確に示されていないといえる。この状況は、他産業分野においてもほぼ同様であるとしている[1]。製品のIM(インバースマニュファクチャリング)を実証するための研究グループであるインバースマニュファクチャリングフォーラム（(財)製造科学技術センター）のライフサイクル設計委員会では、将来に向けたライフサイクル設計の課題として以下[1]を示している。

- ・ 分解性やリサイクル性を高める設計およびLCA評価などは、ライフサイクルにおける各論的な技術であり、製品構成物質の循環を前提とした製品形態、製品構造、製品管理システムに関する検討が必要である。
- ・ ライフサイクル設計の前提として、ライフサイクル戦略の策定とループ構造の設計が必要である。
- ・ 循環型基本法において基本コンセプトとされている3R(Reduce-Reuse-Recycle)[2]の実現方法を具体化することが必要である。

建設業においても、コンクリート構造物を生産する工程のいわゆる下流段階であるコンクリート塊から再生骨材を合理的に回収する生産行為が、現在のリサイクルの研究に関する主要な目的となっており、構造物の企画設計段階から、解体・処理段階までの一連の流れを包含するライフサイクル設計コンセプトに関しては、十分に検討されていないのが現状である。

本研究では、第3章で導かれたライフサイクル設計手法を可能にする材料の法則を利用して、コンクリート構造物およびその構成材料の材料保存性および資源循環性を確保を前提としたライフサイクル設計手法の確立を目的とする。ライフサイクル設計フレームの構築および構造物の寿命概念を考慮した上でライフサイクル設計に包含され、構造物の本質的機能を充足するための個別設計要素の概念を確立し、コンクリート構造物のライフサイクルが企画設計段階で具体的になり、目標とする更新形態が完備される仕組みを提案する。

4.2 ライフサイクル設計のコンセプト

4.2.1 ライフサイクル設計に包含される個別設計要素と設計目的

コンクリート構造物として、ライフサイクル全般にわたり総合的に要求される所要性能を保持し続けるためには、躯体を中心に要求される構造安全性に加え、長期に渡り建築物として要求される機能性を充足していくことが必要となる。つまり、建築物としての使用上の機能性が確保された上で、構造物としての構造安全性が充足すれば、その本質的価値は低下することなく、半永久的に使用され続けることも想定できる。この場合、消費者は、新規の建築物を獲得することに固執せず、ストックされている既存建築物を使用するようになり、建築物自身の繰り返し使用を可能とする状況を導くことが予想される。また、スクラップアンドビルドに傾倒した現在の消費形態を根本的に解決することができると思われる。

以上より、建築物として必要となる本質的機能および、同機能の制御要因を明らかにし、それらの要因をライフサイクル設計に組み込むことは、資源循環性を考慮したライフサイクル設計手法を実証する上で非常に重要となる。

本章では、コンクリート構造物におけるライフサイクル設計のフレームを明確にするために、ライフサイクル設計に包含され、建築物に必要な本質的機能を制御する個別設計要素を提示し、その性質を明らかにする。そして、提示された個別設計要素に内在する本質的機能を長期に渡り充足するための設計目的を明らかにし、それらを具体的に設計手法に反映する方法を導くことを目的とした検討を行う。

建築物のライフサイクルを考える場合、建築物の寿命が深く関係することは明らかである。建築物の寿命を性能として指標化した事例としては、1997 年度版 JASS5 における建築物の総合的耐久性指標において、大規模修繕不要期間として3段階(30 年、65 年、100 年)を設定した事例[3]や、2000 年施行の住宅の品質確保の促進等に関する法律において、「劣化の軽減に関すること」の内容において、住宅の限界状態到達期間を3段階(3 世代以上、2 世代以上、2 世代未満)を設定した事例[4]などが挙げられる。これらの寿命指標は、建築物における特定の部位・部材における特定の性質に関する指標を、構造体自身の耐久性と関係づけて指標化されたものであり、部材・材料レベルでの物理的性能が高められ、指標が優れると判断される場合、建築物の耐久性も同時に向上し、寿命拡大に繋がるというものである。これは、建築物およびその構成材料の個々に要求される本質的機能が反映されたものではないと思われる。以上より、建築物および構成材料の本質的機能を、直接的に設計法に反映するような仕組みの開発が改めて必要であることがわかる。

図 4.2.1 に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を示す。性能設計における建

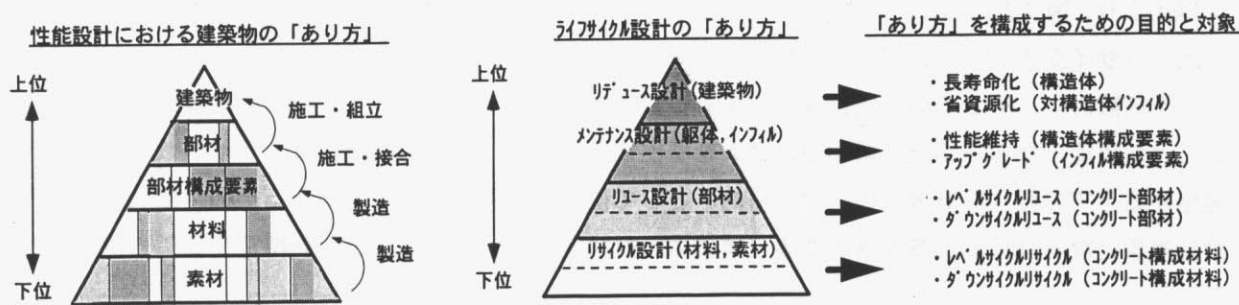


図 4.2.1 ライフサイクル設計に包含される個別設計要素のヒエラルキー

表 4.2.1 建築物構成要素における本質的機能

構成要素	個別設計要素	本質的機能
建築物および部材	リデュース設計	耐久性が確保され、長寿命化につながるための機能 初期および更新時における資源投入量が低減する機能
建築物、部材および部材構成要素	メンテナンス設計	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が果たされる機能
部材、部材構成要素および材料	リユース設計	更新による品質低下がなく、再生部材として使用が可能になる機能 更新により品質低下した上で、再生部材として使用が可能になる機能
材料および素材	リサイクル設計	更新による品質低下がなく、再生材料として使用が可能になる機能 更新により品質低下した上で、再生材料として使用が可能になる機能

建築物のあり方のヒエラルキーに関しては、NKB Level System[5]の概念を元に検討された物質性能ヒエラルキーにより説明が可能であり、下位概念から、素材、材料、部材構成要素、部材、建築物により構成されるものと理解する。その概念を応用し、ライフサイクル設計のコンセプトを導出するためには、物質性能ヒエラルキーの構成要素に対する構造物の資源循環性を考慮した本質的機能を明らかにすることで可能となる。

表 4.2.1 に性能設計における建築物の構成要素に要求される本質的機能と個別設計要素の関係を示す。物質性能ヒエラルキーにより区別された各種物質性能に対応する形で以下の本質的機能を導出し、定義する。

「建築物および部材要素」の本質的機能は①②であり、「リデュース」を導く個別設計要素の本質的機能として位置づける。

- ①耐久性が確保され、長寿命化につながるための機能
- ②初期および更新時における資源投入量が低減する機能

「建築物、部材および部材構成要素」の本質的機能は③④であり、「メンテナンス」を導く個別設計要素の本質的機能として位置づける。

- ③一定期間の性能を維持するための機能
- ④定期的な更新により性能向上が果たされる機能

「部材構成要素および材料」の本質的機能は⑤⑥であり、「リユース」を導く個別設計要素の本質的機能として位置づける。

- ⑤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
- ⑥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

「材料および素材」の本質的機能は⑦⑧であり、「リサイクル」を導く個別設計要素の本質的機能として位置づける。

- ⑦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
- ⑧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

以上より、図 4.2.1 に示すライフサイクル設計の個別設計要素のヒエラルキーは、材料・素材を対象とした「リサイクル設計」、部材を対象とした「リユース設計」、躯体・インフィルを対象とした「メンテナンス設計」、そして構造物自身を対象とした「リデュース設計」の 4 大個別設計要素により構成することが可能となる。また、個別設計要素を導出するための「本質的機能」は、ライフサイクル設計を実施する上での個別設計要素の「設計目的」として位置づけることが可能であるため、個別設計要素の設計対象となる具体的な基本構成要素（構造物、対構造物インフィルなど）を特定することが可能となる。

4.2.2 ライフサイクル設計の構成

ライフサイクル設計は、「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」という4大個別設計要素を包含し、それを階層化した総合的設計手法として構成されることが示された。その大きな特徴は、ライフサイクル設計に予め逆工程の生産システムである「リユース設計」および「リサイクル設計」が導入されている点に集約されよう。また企画設計の段階におけるライフサイクル設計の導入により、建築物の基本構成要素およびその具体的要素（構造体、動線設備、柱部材、二次部材、個別空調ユニット、コンクリート、骨材など）に対する使用・更新方法を特定することが可能となり、建築物全体における解体・処理後のあり方についても制御することが可能となるため、その仕組みを具現化することの意義は大きいと考えられる。

ライフサイクル設計手法の特徴を具体的に説明する。表 4.2.2 にライフサイクル設計手法により決定される構造物の特徴を示す。左より、建築物の「物質性能ヒエラルキー」、ライフサイクル設計における「個別設計要素」、個別設計要素における「設計目的」、設計目的の対象となる「基本構成要素」、基本構成要素の「具体的要素」および「更新後の利用方法」により、その全体が示される。

物質性能ヒエラルキーにおける「建築物」に対応する「A リデュース設計」に関しては、鉄筋コンクリート柱・梁および壁フレームによる構造体に対し、「1.長寿命化」を目的とした設計を行い、更新後も同一機能を有する製品として使用を可能にする段階と、動線設備・電気系統集中配管設備および上下水集中配管設備などによる対構造体インフィル（構造体付随設備）に対し、「2.省資源化」を目的とした設計を行い、更新後も同一機能を有する対構造体インフィルとして使用を可能にする形で構成される。

表 4.2.2 ライフサイクル設計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	基本構成要素	具体的要素	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。

物質性能ヒエラルキーにおける「部材」に対応する「B メンテナンス設計」は、鉄筋コンクリート柱部材・梁部材・壁部材・非構造壁および二次部材などによる構造体構成要素に対し、「3.性能維持」を目的とした設計を行い、更新後も同一機能を有する構造体構成要素として使用を可能にする段階と、個別空調ユニットおよび個別給湯設備などによるインフィル構成要素に対し、「4.アップグレード」を目的とした設計を行い、更新後も同一機能を有するインフィル構成要素として使用を可能にする形で構成される。

物質性能ヒエラルキーにおける「部材構成要素」に対応する「C リユース設計」は、鉄筋コンクリート柱部材・梁部材・壁部材・非構造壁および二次材料などによるコンクリート部材に対し、「5.レベルサイクルリユース」および「6.ダウンサイクルリユース」を目的とした設計を行い、前者は更新後も同一機能を有するコンクリート部材として、後者は更新後はコンクリート部材として要求性能の低い非構造壁および二次材料として使用を可能にする形で構成される。

最後に、物質性能ヒエラルキーにおける「材料」に対応する「D リサイクル設計」は、細骨材・粗骨材およびセメント硬化体などによるコンクリート構成材料に対し、「7.レベルサイクルリサイクル」および「8.ダウンサイクルリサイクル」を目的とした設計を行い、前者は更新後も同一機能を有する原骨材およびセメント原料として、後者は更新後はコンクリート構成材料として要求性能の低い低品質再生骨材および粉体系材料として使用を可能にする形で構成される。

以上により、図 4.2.2 にライフサイクル設計における個別設計要素と設計目的の概念図が示される。

企画設計段階においてライフサイクル設計手法を導入することにより、建築物は物質性能ヒエラルキーに対応する個別設計要素が明らかになり、それぞれの本質的機能を充足するための設計目的を定めることが可能になる。そして、結果的に構造物およびその構成要素の更新のあり方を予め制御することが可能になることが示された。

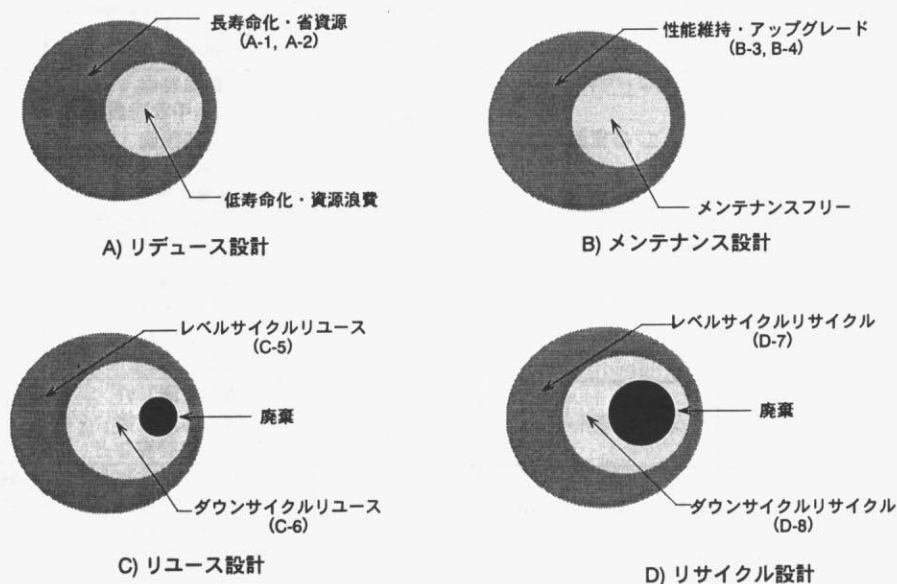


図 4.2.2 構造物の本質的機能を考慮した設計目的の関係

4.2.3 既存構造物におけるライフサイクル設計の適用度評価

国内における既存建築物の生産システムは、その大部分が順工程生産システムに基づいているため、解体処理段階において、その構成材料を再資源化するには困難が伴う。従って、逆工程付加型一順工程生産システムについても、実務的なレベルで継続的に適用される部類の構造物は極めて少なく[6]、その中でも、逆工程における解体・処理後の建設廃材の再資源化を過大なコストを要することなく実施することは極めて困難になるといえる。つまり、本章で提案するライフサイクル設計の既存構造物への適用度は、現状では極めて低いものと想定される。しかしながら、このような結果を導く原因となる設計上の問題点を明らかにし、ライフサイクル設計の観点から現状の生産システムの特徴を客観的に評価することは、循環型社会における建築構造物の設計の仕組みを改善・開発していくためにも重要となる。

既存の建築構造物に対するライフサイクル設計の適用度評価を行う。時系列ごとに3系統の建築構造物を対象とする。その内容は、1905年に日本で本格的な鉄筋コンクリート構造物[7]が登場してから順工程生産システムにより社会基盤を構築してきた循環型社会元年を迎える直前である1999年までの「社会基盤創成期」、2000年の循環型社会元年以降の「循環型社会創成期(2系統)」とし、個別設計要素(4種類)と設計目的(8種類)の反映度よりライフサイクル設計の適用度として評価する。この結果により、既存コンクリート構造物に内在するライフサイクルに関連する要求性能や特性などが明確にされる。

(1)社会基盤創成期

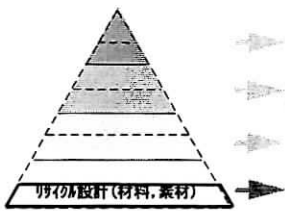
社会基盤創成期におけるコンクリート産業の動向と注目される開発技術は、1950年のコンクリートポンプの量産化、1951年の国内初のアジテータトラックの登場、1957年の砕石使用生コンの登場、1963年の日本初のサスペンションプレヒーター付きSPキルンによるセメント製造開始、1964年の高性能減水剤の開発、1971年の生コン製造のコンピューター制御化などが具体的に挙げられ[8-10]、現在のコンクリート産業の基盤となる技術が、登場し始めた時期であるといえる。一方、コンクリート構造物における公的規格・仕様書、品質保証の仕組みは、十分に整備されていたとはいえず、現在一般的に用いている工業規格や仕様書などは、同程度の時期に制定作業が開始されるというような状況であったといえる。ちなみに日本建築学会・鉄筋コンクリート工事標準仕様書(JASS5)は、1952年に制定され、その後1974年までに1957年、1965年、1969年の3回にわたり改定作業が実施されている。そこでは、建築構造物用コンクリートの技術開発は、構造物の構造安全性を確保するために必要な基礎力学特性の解明に重点が置かれ、流動性および耐久性の向上等に関わる検討は途上段階にあったといえる。

高度成長期以降においては、1975年の流動化コンクリートの開発、1981年の水中不分離性コンクリート、鋼繊維コンクリートの導入、1985年の炭素繊維補強コンクリートの登場、1988年のハイパフォーマンスコンクリート、New RCの開発、1992年の低熱ポルトランドの開発、そして1994年の完全リサイクルコンクリートの開発などが具体的に挙げられ[8-10]、既存のコンクリート製造技術を応用し、新しいコンクリートの開発が実行された時期であるといえる。コンクリート構造物における公的規格・仕様書、品質保証の仕組みは、技術の進歩に伴う更新作業が繰り返し行われ、日本建築学会・鉄筋コンクリート工事標準仕様書(JASS5)についても、随時行う改定作業に加え、1975年、1985年、1997年に大改訂作業が実施された。またJIS A 5308の「レディーミクストコンクリート」を中心に、各種コンクリートおよび構成材料に関する品質規準を定めた工業規格の新制定・改定作業が頻繁に実施され、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に関しては、1997年にISOと整合化させる国際化対応なども実施された。構造物

コンクリートの技術開発についても、構造物の構造安全性を確保するために必要な基本的性質の検討に加え、コンクリートの流動特性、耐久性の向上に対する技術的対策が精力的に実施されたといえる。しかしながら、実務レベルでは、生産の順工程の合理化とコスト低減を図る建設技術が更に重要視されるようになり、順工程生産システムを起源とした膨大な構造物群を発生させる結果を導いたといえる。経済成長安定期の後半においては、逆工程付加型一順工程生産システムも登場し、「資源の有限性」が生産工程で考慮されるような状況となったが、「資源の有限性」と「生産合理化とコスト削減」の両立を図ることを目的とした設計法は未構築であった。

以上の内容を考慮して、ライフサイクル設計の適用度は表 4.2.3 のように評価される。製造および生産における 3R 概念は定着しており、「A リデュース設計」、「B メンテナンス設計」、「C リユース設計」および「D リサイクル設計」の個別設計要素に対する言語的理解は一般的となったが、それらを包含する設計法の概念は構築されておらず、逆に、構造物のライフサイクルにおける各論的な方策が具体化された時期といえる。従って、No.1-8 の設計目的は、相互関連性を明確にした形では存在せず、概念自身が存在しない時期もあったと判断される。また、ライフサイクル設計の基盤であり、合理的なリサイクルを実行する上で重要度が高い「D7.リサイクル設計におけるレベルサイクルリサイクル」を技術的に達成する手法が具体化された事例は極めて少なかったため[12]、上位概念である「A リデュース設計」「B メンテナンス設計」「C リユース設計」を部分的に導入した構造物においても、結果的に「D8.ダウンサイクルリサイクルによるリサイクル設計」が適用される程度に止まったといえる。以上により、構造物の構成材料は、緩やかなダウンサイクルによる更新形態を繰り返し、非構造用コンクリート材料および再生砕石に原料化される複環状のオープンループによる循環形態が形成されていたと考えられる。

表 4.2.3 社会基盤創成期におけるライフサイクル設計の適用度評価

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		個別設計要素のヒエラルキー	
A	リデュース設計	1. 長寿命化	—		<ul style="list-style-type: none"> ・ライフサイクル設計(レベル・リデュース設計)が完備しない ・上位個別設計要素の有無によらず ・ダウンサイクルによる更新形態をとる ・オープンループによる循環形態 ・ライフサイクル設計の確立は困難
		2. 省資源化	—		
B	メンテナンス設計	3. 性能維持	—		
		4. アップグレード化	—		
C	リユース設計	5. レベルサイクルリユース化	—		
		6. ダウンサイクルリユース化	—		
D	リサイクル設計	7. レベルサイクルリサイクル化	×		
		8. ダウンサイクルリサイクル化	○		

備考) ○：個別設計要素として概念が一般化しており、実用化に向けた検討がなされたか推定される場合
 —：個別設計要素として概念が一般化しているが、実用化に向けた検討がなされたか不明確である場合
 ×：個別設計要素として一般化しておらず実用化に向けた検討がなされていない場合

(3) 循環型社会創成期－SI 建築－

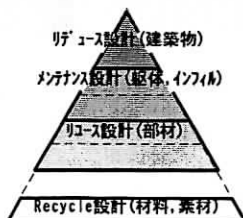
循環型社会創成期は、建築構造物に限らず循環型社会基本法に基づく立法支援策により生産初期段階における廃棄物の発生抑制が可能になる技術が優先的に導入されるようになった。「資源有限性」と「生産の合理化とコスト低減」の両立に関しても具体的に検討されるようになり、順工程生産システムでは想定されなかった新しい技術や概念が生まれる可能性が期待される。

循環型社会創成期における第1の事例として、構造躯体の高耐久化および内部空間の更新性向上などの特性により、建築物の長寿命化を実証すると謳われている SI(スケルトン－インフィル)建築[13-14]についてライフサイクル設計の適用度を評価する。SI 建築は、構造物が恒久的に存在することを前提とした企画設計を実施しており、3R 概念についてもできるだけ反映することが生産上の目的の一つとなっているため、企画段階で「A リデュース設計」「B メンテナンス設計」「C リユース設計」については、構造躯体および設備類の性質として具体的に反映させることを可能としたことは特徴であるといえる。

以上の内容を考慮して、ライフサイクル設計の適用度は表 4.2.4 のように評価される。SI 建築は、「A1. リデュース設計における長寿命化」を大前提としているため、コンクリートは高強度となる傾向があり、一般的に構造体は構造的損傷や材料的損傷を受けにくいと考えられる。そして、建築物として使用が困難になる段階までは、A－C の指標に包含される No.1－6 の設計目的を達成することが可能になるが、一度躯体が損傷を受けて使用不可能になった場合に、構造物の再資源化手法を考慮していない材料設計が適用されているため、解体処理の段階で原骨材およびセメント原料を効率良く回収すること更に困難となる。材料の高強度化により建築物の更新周期は長くなるものの、ライフサイクル設計の基盤である「D7.リサイクル設計におけるレベルサイクルリサイクル化」による技術的解決を検討しない限りは、「D リサイクル設計」の適用度は、再生資源の品質低下を拡大する「8.ダウンサイクルリサイクル化」が実行される程度に止まる状況を導く。結果的に構造物の構成材料は、経済成長安定期における構造物と同様に、緩やかなダウンサイクルによる更新形態を繰り返し、非構造用コンクリート材料および再生砕石に原料化される複環状のオープンループによる循環形態が形成されることが考えられる。

なお SI 建築と同様の性格を有する構造物としてプレキャスト造構造物が挙げられる。プレキャスト部材は順工程の合理化を考慮して開発された手法であるが、一方で部材リユースが容易になる可能性が示されている。しかしながら、構造物規模に応じた接合部における分解組立性を明確に示さなければ、部材リユースは困難になり、結果的にリサイクルを前提とした解体処理が実施される可能性が高いと考えられる。従って、プレキャスト造構造物においても部材および材料としての資源循環性を確保するために、リサイクル設計を考慮したライフサイクル設計の適用が重要になると考えられる。

表 4.2.4 循環型社会創成期－SI 建築－におけるライフサイクル設計の適用度評価

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		個別設計要素のヒエラルキー	
A	リデュース設計	1. 長寿命化	○		<ul style="list-style-type: none"> リサイクル設計(レベルサイクル)が完備しない 上位個別設計要素の有無によらずダウンサイクルによる更新形態をとる オープンループによる循環形態 ライフサイクル設計の確立は困難
		2. 省資源化	○		
B	メンテナンス設計	3. 性能維持	○		
		4. アップグレード化	---		
C	リユース設計	5. レベルサイクルリユース化	---		
		6. ダウンサイクルリユース化	---		
D	リサイクル設計	7. レベルサイクルリサイクル化	×		<ul style="list-style-type: none"> 高強度コンクリート(コンクリート構成材料) ダウンサイクルリサイクル(コンクリート構成材料)
		8. ダウンサイクルリサイクル化	○		

備考) ○：個別設計要素として一般化しており実用化に向けた検討がなされたかと推定される場合
 ---：個別設計要素として一般化しているが実用化に向けた検討がなされたか不明確である場合
 ×：個別設計要素として一般化しておらず実用化に向けた検討がなされていない場合


(4) 循環型社会創成期－完全リサイクル住宅－

循環型社会創成期の第2の事例である完全リサイクル住宅[15]は、住宅建築をモデルに、住宅自身、構成要素に対し、規格化・標準化、分解性設計および構造の単純化・軽量化などを設計に積極的に導入し、リサイクル率を80%以上に向上させることを可能とする設計コンセプトが導入されている。なお同住宅においては、その構造材料にセメント回収型－完全リサイクルコンクリートを適用している。

ライフサイクル設計の適用度は表4.2.5のように評価される。完全リサイクル住宅は、SI建築と同様に、3Rの概念を反映することを生産上の目的としているが、SI建築と相違する点は、企画段階で具体的に「Aリデュース設計」「Bメンテナンス設計」「Cリユース設計」に加え「Dリサイクル設計」を構造躯体および設備類に反映することを一般化している点である。従って、構造物が構造的損傷や材料的損傷を受けて建築として機能できなくなる段階においても、設計目的A-Dに包含されるNo.1-8の設計目的の達成を可能とする。そして、SI建築において導入されていない、ライフサイクル設計の基盤である「D7.リサイクル設計におけるレベルサイクルリサイクル化」に関しても、構造物コンクリートの全量をセメント回収型－完全リサイクルコンクリートとしているため、解体後は、コンクリート塊の全量は適度に粉碎処理し、セメントキルンでの焼成工程を経るだけで、全量はセメントとなる[16]。構成材料は、レベルサイクルの更新形態となり、再生資源の全量は再びコンクリート材料として使用され、単環状のクローズドループによる循環形態を形成すると考えられる。

以上、4系統の既存建築構造物に対し、ライフサイクル設計の適用度を検討した。結論として、順工程生産システムに基づく建築構造物は、積み上げ型ヒエラルキーの基盤となる「D7.リサイクル設計のレベルサイクルリサイクル」の概念が欠如しており、その結果、ライフサイクル設計の反映度は非常に低くなるため、構造物の構成材料はダウンサイクルによる更新形態を繰り返し、複環状のオープンループによる循環形態が形成される傾向があるといえる。しかし、わずかな事例ではあるが、企画設計段階において、レベルサイクルリサイクルを考慮した建築構造物やレベルサイクルを前提とした逆工程付加型のリサイクルを可能にする技術[17-18]も実務的に検討されるようになったため、建築物におけるライフサイクル設計の適用性は今後拡大することが期待される。

表 4.2.5 循環型社会創成期－完全リサイクル住宅－におけるライフサイクル設計の適用度評価

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		個別設計要素のヒエラルキー	
A	リデュース設計	1. 長寿命化	○		<ul style="list-style-type: none"> ・リサイクル設計(レベルサイクル)が完備 ・上位個別設計要素の有無によらずレベルサイクルによる更新形態をとる ・クローズドループによる循環形態 ・ライフサイクル設計の確立が可能
		2. 省資源化	○		
B	メンテナンス設計	3. 性能維持	○		
		4. アップグレード化	○		
C	リユース設計	5. レベルサイクルリユース化	○		
		6. ダウンサイクルリユース化	○		
D	リサイクル設計	7. レベルサイクルリサイクル化	○		<ul style="list-style-type: none"> ・レベルサイクルリサイクル(コンクリート構成材料) ・ダウンサイクルリサイクル(コンクリート構成材料)
		8. ダウンサイクルリサイクル化	○		

備考) ○: 個別設計要素として概念が一般化しており、実用化に向けた検討がなされたか推定される場合
 一: 個別設計要素として概念が一般化しているが、実用化に向けた検討がなされたか不明確である場合
 ×: 個別設計要素として概念が一般化しておらず、実用化に向けた検討がなされていない場合

4.3 ライフサイクル設計の実装

4.3.1 個別設計要素と設計目的における設計レベルマトリックス

コンクリート構造物の企画設計段階においてライフサイクル設計を導入することは、構造物およびその構成材料が有する本質的機能を維持した上で、想定した期間使用され続け、使用限界に到達した際には、予め想定した解体・処理方法により更新されるようにすることを最終目標として定め、企画設計段階で建築物に要求される性能を具体的に検討することであるといえる。この場合、ライフサイクル設計における4種類の個別設計要素と8種類の設計目的を明確にすることがその作業項目として挙げられる。

表4.3.1に4種類の個別設計要素と8種類の設計目的を明確にするための設計レベルマトリックスを示す。本表は、積み上げ型ヒエラルキーにおける「A リデュース設計」「B メンテナンス設計」「C リユース設計」および「D リサイクル設計」に包含される8種類の設計目的に対し、該当する設計目的をアミで示すことで設計レベルが分類される構成となっている。なお、設計レベル番号が小さいほど、恒久化対応のライフサイクル設計が適用される仕組みとなっている。以下にその概要を説明する。

設計レベルマトリックスにおける設計レベル01～11は、構造物がA1、A2、B3、B4の設計目的を充足することを必須条件としているため、省資源対応でかつ恒久的に構造物の構造安全性と使用上の機能を維持することが可能となる恒久化建築となる。またC5、C6、D7、D8の設計目的は選択条件となっており、その組み合わせとして、解体・処理時に当該建築物内、当該建物内外、当該建物外において①構造部材、②構造部材・材料、③構造部材・非構造部材、④構造部材・原材料、⑤非構造部材、⑥非構造部材・材料、⑦非構造部材・原材料、⑧材料、⑨材料・原材料、⑩原材料のいずれかによりコンクリートが再利用されて更新する場合、⑪当該建築物内外においてコンクリートが再利用されずに最終処分される場合に分類可能となる。

設計レベル12～22に該当する設計要素は、構造物がA1、A2、B3の設計目的を充足することを必須条件としているが、「B4.メンテナンス設計におけるインフィル構成要素のアップグレード」に関する設計目的を考慮していないため、省資源対応で長期的に構造物の構造安全性と使用上の機能を維持することが可能となる省資源対応型－長寿命化建築となる。またC5、C6、D7、D8の設計目的は選択条件とされており、上記設計レベル01～11の場合と同様にその特徴を分類することが可能になる。ちなみにSI建築は設計レベル22に該当する可能性がある。

設計レベル23～33に該当する設計要素は、構造物がA1、B3の設計目的を充足することを必要条件としており、「A2.リデュース設計における対構造体インフィルの省資源化」および「B4.メンテナンス設計におけるインフィル構成要素のアップグレード」に関する設計目的は考慮しないため、省資源型には対応しないが長期的にその構造安全性と機能を維持することが可能となる長寿命化建築となる。またC5、C6、D7、D8の設計目的は選択条件とされており、上記設計レベル01～11の場合と同様にその特徴を分類することが可能になる。

設計レベル34～44に該当する設計要素は、構造物がA1、A2の設計目的を充足することを必要条件としており、「B3.メンテナンス設計における構造体構成要素の性能維持」および「B4.インフィル構成要素のアップグレード」に関する設計目的は考慮していないため、省資源対応型で中長期的に構造安全性のみを維持することを可能にする省資源対応－寿命考慮型建築となる。またC5、C6、D7、D8の設計目的は選択条件とされており、設計レベル01～11の場合と同様にその特徴を分類することが可能になる。

表 4.3.1 個別設計要素と設計目的の組み合わせマトリックス

設計 レベル	個別設計要素と設計目的								決定する構造物の特徴
	リデュース設計		メンテナンス設計		リユース設計		リサイクル設計		
	A-1	A-2	B-3	B-4	C-5	C-6	D-7	D-8	
01									当該建築内で構造部材としての循環を前提とした恒久化建築
02									当該建築内で構造部材・材料としての循環を前提とした恒久化建築
03									当該建築内外で構造・非構造部材としての循環を前提とした恒久化建築
04									当該建築内外で構造部材・原材料としての循環を前提とした恒久化建築
05									当該建築内外で非構造部材・材料としての循環を前提とした恒久化建築
06									当該建築外で非構造部材としての循環を前提とした恒久化建築
07									当該建築外で非構造部材・原材料としての循環を前提とした恒久化建築
08									当該建築内で材料としての循環を前提とした恒久化建築
09									当該建築内外で材料・原材料としての循環を前提とした恒久化建築
10									当該建築外で原材料としての循環を前提とした恒久化建築
11									当該建築の構造・非構造部材・材料・原材料の廃棄を前提とした恒久化建築
12									当該建築内で構造部材としての循環を前提とした省資源対応ー長寿命化建築
13									当該建築内で構造部材・材料としての循環を前提とした省資源対応ー長寿命化建築
14									当該建築内外で構造・非構造部材としての循環を前提とした省資源対応ー長寿命化建築
15									当該建築内外で構造部材・原材料としての循環を前提とした省資源対応ー長寿命化建築
16									当該建築内外で非構造部材・材料としての循環を前提とした省資源対応ー長寿命化建築
17									当該建築外で非構造部材としての循環を前提とした省資源対応ー長寿命化建築
18									当該建築外で非構造部材・原材料としての循環を前提とした省資源対応ー長寿命化建築
19									当該建築内で材料としての循環を前提とした省資源対応ー長寿命化建築
20									当該建築内外で材料・原材料としての循環を前提とした省資源対応ー長寿命化建築
21									当該建築外で原材料としての循環を前提とした省資源対応ー長寿命化建築
22									当該建築の構造・非構造部材・材料・原材料の廃棄を前提とした省資源対応ー長寿命化建築
23									当該建築内で構造部材としての循環を前提とした長寿命化建築
24									当該建築内で構造部材・材料としての循環を前提とした長寿命化建築
25									当該建築内外で構造・非構造部材としての循環を前提とした長寿命化建築
26									当該建築内外で構造部材・原材料としての循環を前提とした長寿命化建築
27									当該建築内外で非構造部材・材料としての循環を前提とした長寿命化建築
28									当該建築外で非構造部材としての循環を前提とした長寿命化建築
29									当該建築外で非構造部材・原材料としての循環を前提とした長寿命化建築
30									当該建築内で材料としての循環を前提とした長寿命化建築
31									当該建築内外で材料・原材料としての循環を前提とした長寿命化建築
32									当該建築外で原材料としての循環を前提とした長寿命化建築
33									当該建築の構造・非構造部材・材料・原材料の廃棄を前提とした長寿命化建築
34									当該建築内で構造部材としての循環を前提とした省資源対応ー寿命考慮型建築
35									当該建築内で構造部材・材料としての循環を前提とした省資源対応ー寿命考慮型建築
36									当該建築内外で構造・非構造部材としての循環を前提とした省資源対応ー寿命考慮型建築
37									当該建築内外で構造部材・原材料としての循環を前提とした省資源対応ー寿命考慮型建築
38									当該建築内外で非構造部材・材料としての循環を前提とした省資源対応ー寿命考慮型建築
39									当該建築外で非構造部材としての循環を前提とした省資源対応ー寿命考慮型建築
40									当該建築外で非構造部材・原材料としての循環を前提とした省資源対応ー寿命考慮型建築
41									当該建築内で材料としての循環を前提とした省資源対応ー寿命考慮型建築
42									当該建築内外で材料・原材料としての循環を前提とした省資源対応ー寿命考慮型建築
43									当該建築外で原材料としての循環を前提とした省資源対応ー寿命考慮型建築
44									当該建築の構造・非構造部材・材料・原材料の廃棄を前提とした省資源対応ー寿命考慮型建築
45									当該建築内で構造部材としての循環を前提とした寿命考慮型建築
46									当該建築内で構造部材・材料としての循環を前提とした寿命考慮型建築
47									当該建築内外で構造・非構造部材としての循環を前提とした寿命考慮型建築
48									当該建築内外で構造部材・原材料としての循環を前提とした寿命考慮型建築
49									当該建築内外で非構造部材・材料としての循環を前提とした寿命考慮型建築
50									当該建築外で非構造部材としての循環を前提とした寿命考慮型建築
51									当該建築外で非構造部材・原材料としての循環を前提とした寿命考慮型建築
52									当該建築内で材料としての循環を前提とした寿命考慮型建築
53									当該建築内外で材料・原材料としての循環を前提とした寿命考慮型建築
54									当該建築外で原材料としての循環を前提とした寿命考慮型建築
55									当該建築の構造・非構造部材・材料・原材料の廃棄を前提とした寿命考慮型建築
56									当該建築内で構造部材としての循環を前提とした短寿命化建築
57									当該建築内で構造部材・材料としての循環を前提とした短寿命化建築
58									当該建築内外で構造・非構造部材としての循環を前提とした短寿命化建築
59									当該建築内外で構造部材・原材料としての循環を前提とした短寿命化建築
60									当該建築内外で非構造部材・材料としての循環を前提とした短寿命化建築
61									当該建築外で非構造部材としての循環を前提とした短寿命化建築
62									当該建築外で非構造部材・原材料としての循環を前提とした短寿命化建築
63									当該建築内で材料としての循環を前提とした短寿命化建築
64									当該建築内外で材料・原材料としての循環を前提とした短寿命化建築
65									当該建築外で原材料としての循環を前提とした短寿命化建築
66									当該建築の構造・非構造部材・材料・原材料の廃棄を前提とした短寿命化建築

設計時に定める本質的機能を充足するための設計目的

(備考) リデュース設計およびメンテナンス設計により特徴づけられる各種建築物の設計目的

恒久化建築: A1+A2+B3+B4 省資源対応ー長寿命化建築: A1+A2+B3
 長寿命化建築: A1+B3 省資源対応ー寿命考慮型: A1+A2
 寿命考慮型建築: A1 短寿命化建築: なし

設計レベル 45～55 に該当する設計要素は、構造物が A1 の設計目的のみを必要条件としており、「A2.リデュース設計における対構造体インフィルの省資源化」、「B3.メンテナンス設計における構造体構成要素の性能維持」および「B4.インフィル構成要素のアップグレード」に関する設計目的は考慮していないため、中長期的にその構造安全性のみを維持することを可能にする寿命考慮型建築となる。また C5、C6、D7、D8 の設計目的は選択条件とされており、設計レベル 01～11 の場合と同様にその特徴を分類することが可能になる。

最後に、設計レベル 56～66 に該当する設計要素は、A1、A2、B3、B4 の設計目的を考慮しないため、短期的にその構造安全性の維持を図る短寿命化建築となる。また C5、C6、D7、D8 の設計目的は選択条件であり、設計レベル 01～11 の場合と同様にその特徴の分類が可能になるが、当該グループの構造物から発生する再生品を上位設計レベルの構造物に用いることは材料の低品質化により一般的に困難となる。

個別設計要素と設計目的の組み合わせによる全 66 段階の設計レベルマトリックスが明らかにされた。続いて、ライフサイクル設計における個別設計要素のヒエラルキーと個別設計要素における設計目的の関係づけを行うと図 4.2.3 に示すライフサイクル設計のマスヒエラルキーが形成される。マスヒエラルキーは、ライフサイクル設計における個別設計要素および設計目的の適用度を評価するための指標になると同時にコンクリート構造物の物質性能と形而上的性能の充足度を円錐系ヒエラルキーの形成程度による評価を可能にするものである。またマスヒエラルキーは構造物の更新時や解体処理時に必要となる性能表示指標としても利用可能となる。

図 4.2.4 に設計レベルマトリックスにおける設計レベルに応じたマスヒエラルキーの形態例を示す。構造物の設計目標により、円錐系のマスヒエラルキーの形態に違いがあることわかる。なお構造物の用途に応じた設計時における設定寿命を考慮する必要があるが、マスヒエラルキーと関連づけて地球環境に最も配慮していると判断されるようなコンクリート構造物は、一般的には省資源を前提に長寿命化を可能にする設計が適用されており、かつ解体処理段階において再生品が材料化してレベルサイクルによる更新を果たすものであると考えられる。この場合、マスヒエラルキーの形状は a) の Level 02 に示されるような安定した円錐の形態となるといえる。

続いて、図 4.2.5 に原料概念とマスヒエラルキーの関係を示す。原料概念は前章においてその概要を紹介し、コンクリート構造物の場合、骨材資源などは岩盤などの「素材」から所定の製造工程を経ることによって「材料」となりコンクリート構成材料として使用されるため、コンクリートの材料保存性が確保される前提条件が整備されている構造物であることを説明した。この原料概念とマスヒエラルキーにおいては、個別設計要素のリサイクル設計においてレベルサイクルリサイクルが適用可能な場合、再生品はバージン骨材として材料化するため原料概念における「材料」に回帰することを可能にする。一方、個別設計要素のリサイクル設計においてダウンサイクルリサイクルが適用される場合は、再生品は低品質再

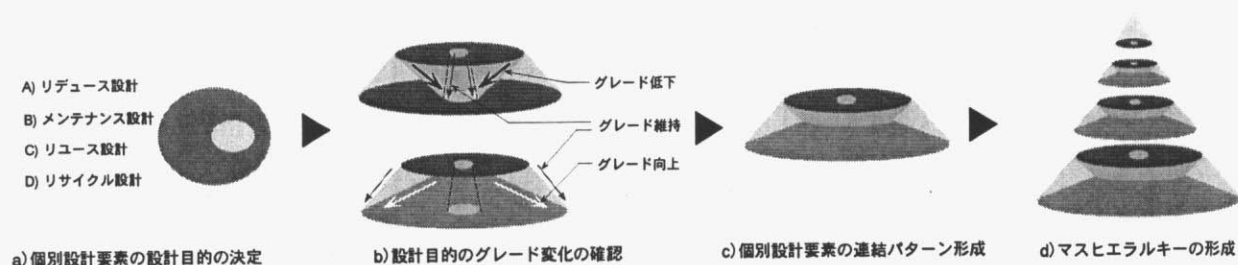


図 4.2.3 ライフサイクル設計におけるマスヒエラルキー

生骨材のように用途が限定される材料となるため、原料概念における「原材料」に回帰することになる。この場合、原料概念とマスヒエラルキーを合わせたヒエラルキーの形態は、くびれのある構造となるために、地球環境保全における不安定要素として作用する可能性が見出されるといえる。

以上により、コンクリート構造物の企画設計段階におけるライフサイクル設計手法の導入を具体的に検討することが可能になると同時に、マスヒエラルキーの形態評価により、構造物のライフサイクル設計の適用度が明確に示されることが確かめられた。

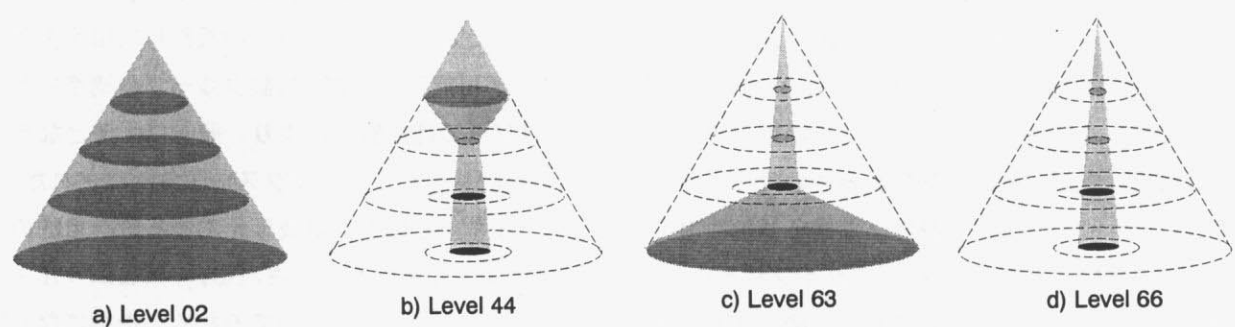


図 4.2.4 設計レベルに応じたマスヒエラルキーの形態事例

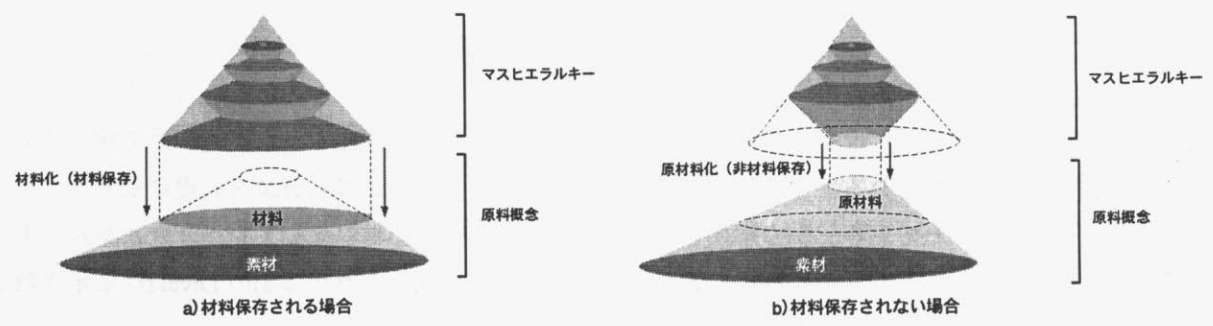


図 4.2.5 原料概念とマスヒエラルキーの関係

4.3.2 ライフサイクル設計の実装モデル

個別設計要素と設計目的の組み合わせによる設計レベルマトリックスにより生成される全 48 種の設計レベルの利用を前提とし、建築物の寿命概念、解体後の更新方法を予め想定した新規構造物について、ライフサイクル設計を反映させた実装モデルの事例を提示する。

まず、コンクリート構造物に要求される寿命概念と解体後の更新方法に関して、現状において考慮される必要があるとされる環境側面を具体化する。その内容として、日本は元来資源稀少国であり、昨今における骨材資源の枯渇および産業活動に伴う環境破壊の顕在化などに起因して、省資源対応を図った上で構造躯体を永続的に使用することが第 1 の条件として挙げられる。また最終処分場の残余量が急速に減少しており、一方で法的に産業廃棄物の発生抑制が義務づけられている状況にあるため、処分量が膨大であるコンクリート構成材料は、路盤材としての需用が見込めなくなった段階で、コンクリート構成材料として全量をマテリアルリサイクルすることが第 2 の条件として挙げられる。以上、この 2 条件を優先的に考慮したライフサイクル設計を行うとする。

個別設計要素と設計目的の組み合わせによる設計レベルマトリックスにおける設計レベルを設定する。第 1 の条件を充足するためには、ライフサイクル設計における設計目的として、「A1.リデュース設計における構造体の長寿命化」および「B3.メンテナンス設計における構造体構成要素の性能維持」の 2 つの設計目的を選定する必要がある。続いて、第 2 の条件を充足するために、「D7.リサイクル設計におけるコンクリート構成材料のレベルサイクルリサイクル化」が選定される必要がある。なお、リサイクル設計においては、レベルサイクルが可能な技術よりもその技術レベルが低い場合に選定される「D8.リサイクル設計におけるコンクリート構成材料のダウンサイクルリサイクル化」および、D8 にも該当しない廃棄物の「最終処分」は実務における部分的な発生は不可避であると考えられるため、それも含めて設計レベルを具体化すると設計レベル 41～44 が選定される。

表 4.3.2 に上記手順により選定されたコンクリート構造物のライフサイクル設計実装モデルを示す。個別設計要素に含まれる設計目的の組み合わせの整理により 4 段階に分類された設計レベルが具体化され、当該構造物の更新時のリサイクル条件、製品特徴なども予め決定される。以下に概要を説明する。

設計レベル41の構造物は、簡易処理により再生材料が用途制限がない状態で同等製品の構成材料として再利用される省資源対応－寿命考慮型設計が適用されており、構造用コンクリートでは原料条件として骨材の優先選択や改質処理が必要となる「①レベルサイクルコンクリート」が該当する。解体・処理

表4.3.2 コンクリート構造物のライフサイクル設計の実装モデル

設計 レベル	リデュース設計	メンテナンス設計	リサイクル設計		リサイクル条件		製品の特徴	
	長寿命化 A1	性能維持 B3	レベルサイクル D7	ダウンサイクル D8	原料条件	破碎条件	種類	主な用途
Level 41	●	●	●	---	骨材選定 骨材改質処理	再生化処理 (一般)	①レベルサイクル コンクリート	構造コンクリート用再生骨材、セメント原料
Level 42	●	●	●	●	---	再生化処理 (高度)	②レベルサイクル コンクリート	構造コンクリート用再生骨材
Level 43	●	●	---	●	---	再生化処理 (一般)	③ダウンサイクル コンクリート	路盤材、非構造コンクリート用再生骨材
Level 44	●	●	---	---	---	簡易処理	④廃棄型 コンクリート	廃棄処分

Level 41：当該建築内で材料としての循環を前提とした省資源対応－寿命考慮型建築
Level 42：当該建築内外で材料・原材料としての循環を前提とした省資源対応－寿命考慮型建築
Level 43：当該建築外で原材料としての循環を前提とした省資源対応－寿命考慮型建築
Level 44：当該建築の構造・非構造部材・材料・原材料廃棄を前提とした省資源対応－寿命考慮型建築

後には、レベルサイクルによる更新形態が確保されているため、再び構造用コンクリート再生骨材や、セメント原料とすることが可能になる。

設計レベル42の構造物は高度処理により再生材料は用途制限がない状態で同等製品の構成材料として再利用される省資源対応－寿命考慮型設計が適用されており、構造用コンクリートでは、処理時に加熱すりもみ方式[18]などの高度処理装置が必要となる「②レベルサイクルコンクリート」が該当する。解体・処理後にはレベルサイクルによる更新形態が確保されているため、再び構造用コンクリート用再生骨材とすることが可能になる。

設計レベル43の構造物は、簡易処理により再生材料は用途制限がある状態で同等製品以下の原料として再利用される省資源対応－寿命考慮型設計が適用されており、解体・処理後にはダウンサイクルによる更新形態の「③ダウンサイクルコンクリート」となるため、再び構造用コンクリート用再生骨材とすることは難しく、非構造用コンクリート用再生骨材や路盤材などに使用される。

最後に、設計レベル24に該当する構造物は、再生材料の廃棄を前提とした省資源対応－寿命考慮型設計が適用されており、解体・処理後には再び構造用コンクリートが再生材料になることはなく最終処分される「④廃棄型コンクリート」として位置づけられる。これらのライフサイクル設計におけるマシエラルキーの形態を図4.3.1に示す。設計レベルが低下するのに従い再生処理段階での問題が発生することが容易に理解できる。

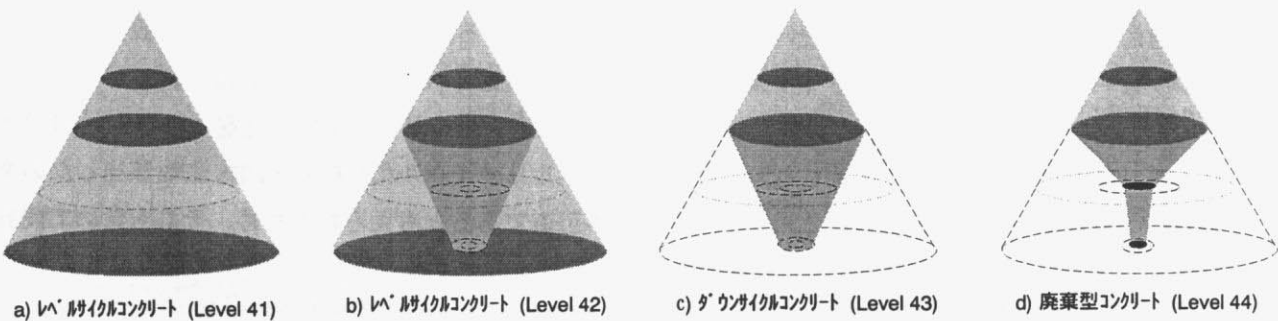


図 4.3.1 実装モデルにおけるライフサイクル設計のマシエラルキー

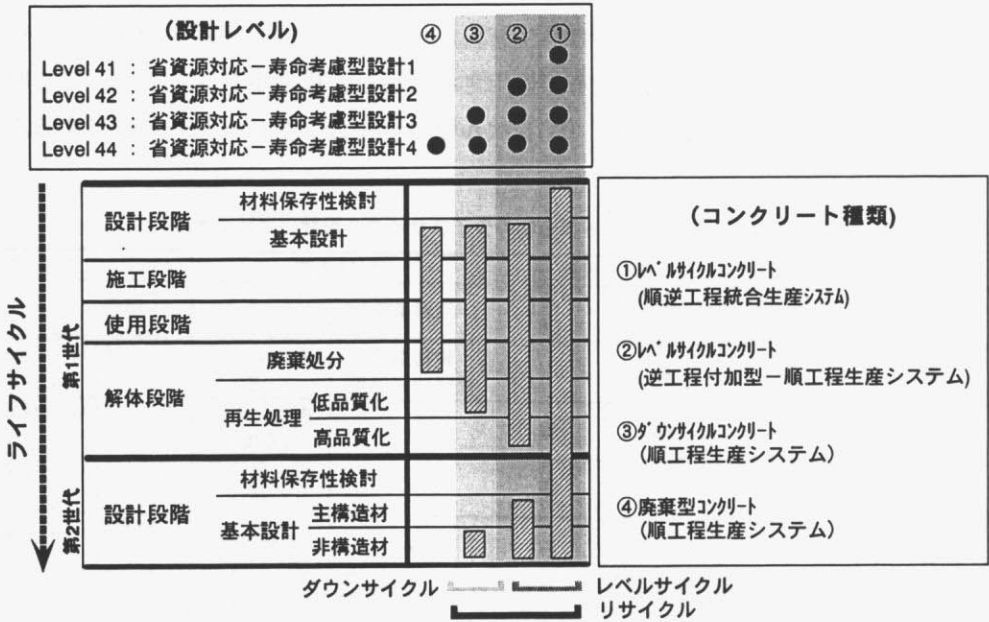


図 4.3.2 構造用コンクリートの循環フロー

上記のコンクリート構造物のライフサイクル設計の実装モデルにより、該当する構造物に使用可能なコンクリート種類の具体的名称と寿命概念および更新手法に関わる種々の特性が決定できることが明らかにされた。図 4.3.2 に上記の各種コンクリートについて、構造物のライフサイクルを通じた使用形態を表す循環フローを示す。構造物ライフサイクルは、第 1 世代におけるライフサイクル設計を含む設計段階、施工段階、供用段階、解体段階、そして再び第 2 世代の設計段階に移行する構成が示されており、各種コンクリートの構造物ライフサイクルにおける適用度が設計レベルと共に明解に示すことが可能となる。「④廃棄型コンクリート」に関しては、第 1 世代の解体段階においてその生涯を閉じる。「③ダウンサイクルコンクリート」は用途が限定されるが第 2 世代まで存在する。「②レベルサイクルコンクリート」は再生処理段階で環境負荷が増大する可能性があるが、第 2 世代においても用途が限定されず存在する。そして「①レベルサイクルコンクリート」は、第 1 および第 2 世代の全工程以降も存在することが可能であり、長期的な存在価値を見出すことができるコンクリートであることが理解できる。

4.3.3 材料保存性を確保するリサイクラブルコンクリート

コンクリート構造物にライフサイクル設計を適用することで、構造物の寿命概念および使用限度に到達した後の更新方法を、予め定められることが示された。そして、現在のコンクリート産業に関わる資源問題、廃棄物処理問題などを客観的に捉え、新規構造物に使用するコンクリートのあり方を見定めると、構造物自身は恒久的な構造安全性を確保し、かつ解体処理時には簡便な破碎処理技術により、再び構造用コンクリートの構成材料としてその全量が再資源化できることを目標にするべきであると考えられる。

表 4.3.3 に材料保存性を確保できるリサイクラブルコンクリートの条件とその定義を示す。同コンクリートは上記目標を実現可能にすることが期待されるコンクリートである。

セメント回収型—完全リサイクルコンクリートは、「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」と定義され、コンクリート構造物中にセメント原料を材料保存することを可能にするものである。また骨材回収型—完全リサイクルコンクリートは、「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」と定義され、コンクリート構造物中に骨材を材料保存することを可能にするものである。現在使用されている一般的なコンクリートの材料構成比を考慮すると、セメントと骨材を回収する双方の技術を組み合わせることで、最適な生産量を導き出し、実務的に使用されるようになれば、構造物の構造安全性を確保しつつ、解体処理段階では簡便な破碎処理技術によりコンクリート全量が再資源化できるとするコンクリート構造物のストックを築くことも十分に可能と思われる。

図 4.3.2 に材料保存性を確保するリサイクラブルコンクリートの資源循環ループを示す。

セメント回収型—完全リサイクルコンクリートに関しては、再生セメントの製造過程で、石膏を添加する工程が発生するが、これは焼成後のセメントクリンカー中で投入した石膏が脱水しないことがセメント製造上の条件となる点、セメント製造プラントにおいて、石膏自身が脱硫工程の副産原料により製造可能である点などにより、同コンクリートを原料とした再生セメントに関しても、石膏は後添加することが一般的な製造の仕組みとして合理的であると考えられる。以上より、同コンクリートはクローズドループの循環形態を確保することが可能になるといえる。

骨材回収型—完全リサイクルコンクリートは、コンクリートの製造過程で、骨材改質処理を行う工程が発生するが、これは骨材回収型コンクリートとするために不可欠な生産工程であるため、予め導入される基本工程として位置づける。それ以外は、従来型コンクリートと同様に製造が可能であり、解体・処理段階では簡便な破碎処理によりその全量が骨材とセメント硬化体に分別され、再び構造用コンクリート構成材料として利用され则认为される。以上より、同コンクリートについてもクローズドループ

表 4.3.3 材料保存性を確保するリサイクラブルコンクリートとその定義

コンクリート名称	定義
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
骨材回収型— 完全リサイクルコンクリート	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し、かつそれ自身がセメント原料となるコンクリート

の循環形態を確保することが可能になるといえる。

順工程生産システムを起源とした従来型コンクリートの再生処理に関しては、「リサイクル＝廃棄処理の一環」という図式が成立したため、例えば、再生骨材を取り出すためのコストは、極力削減する方が望ましく、逆にコストが多大に要する場合は、再生骨材の製造は行わず、簡便な破碎による路盤材用再生碎石の製造、さらには最終処分を優先させるという図式が存在するといえる。そのために現在、再生骨材を高品質化して構造用コンクリートに使用することを推進する流れが新しく生み出されている一方で、「適材適所」と称して低コストでコンクリート塊を路盤材に積極利用して、その技術の優位性をも同時に強調されるという状況がある。その結果、路盤材化の技術は、有効なリサイクル技術として社会的認知を受ける傾向にあるといえる。これは、「製造とリサイクルは別体系」と捉える順工程生産システムでは極めて一般的な傾向であり、逆に合理的な仕組みであるとも捉えることができる。しかし、そのような状況を生み出した背景には、当事者、業界団体、さらには社会の仕組み自体に、長期に渡って順工程生産システムが深く浸透していたため、逆に順逆工程統合生産システムのような根本原理の変更を伴う仕組みの導入を困難にさせる態勢が、明らか存在しているという問題があるといえる。

本章で提案したリサイクラブルコンクリートは、順工程を合理化するシステムを維持しつつ、生産の逆工程を考慮した順逆工程統合生産システムを導くような材料設計を適用できる結果、更新形態はレベルサイクルとなり、廃棄物の発生は大きく抑えられ、環境問題を根本的に解決できる条件が整う材料となる。従って、このコンクリートを使用した生産システムは、従来型の順工程生産システムとは大きく相違する仕組みとして位置づけられ、「生産とリサイクルは同一体系」であることを認識するきっかけとなる生産システムであるといえる。

現在、コンクリートの高強度化、高耐久化を図り、構造物を長寿命化する各論的技術は存在する。しかしながら、同構造物であっても、デザインの陳腐化、空間更新性の制限および使用者および社会の価値観の変化の影響により、結果的に構造物の短寿命化現象は継続されているといえる。この問題には構造物を生産する上での技術的問題を越えた要因が深く関与していることが明らかであり、その理由は理論的には説明が困難なものとして認識されることが適当と思われる。つまり、ライフサイクル設計が完備した場合においても、構造物の寿命を制御することが困難な数多くの要因が発生する可能性は多分にあるといえる。従って、ライフサイクル設計手法は導入することを基本的条件として位置づけた上で、コンクリートの構成材料を完全にリサイクルできる材料設計手法を積極的に導入し、構造物の長寿命化を果たしていくことが重要になるとと思われる。

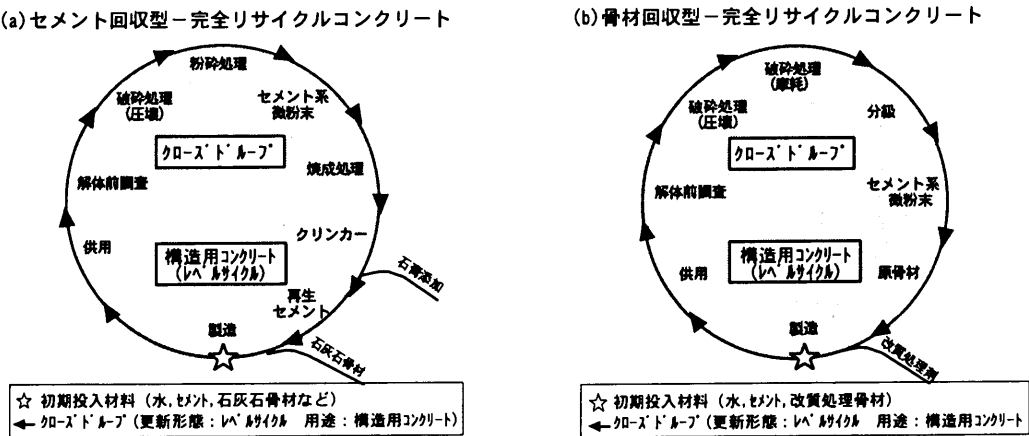


図 4.3.2 材料保存性を確保するリサイクラブルコンクリートの資源循環ループ

4.4 第4章のまとめ

本章では、コンクリート構造物のライフサイクル設計手法を導出するために、ライフサイクル設計に包含される個別設計要素、個別設計要素に対応する設計目的、ライフサイクル設計の実装化手法、そして現状におけるライフサイクル設計に最適な構造用コンクリートのあり方について検討した。結果、以下に示すような知見が得られた。

- 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) 既存構造物におけるライフサイクル設計の適用度は低く、総合的な資源循環の仕組みが構築されないため、構造物の長寿命化および解体・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。
- 4) 個別設計要素と設計目的による組み合わせマトリックスは、構造物の寿命概念と更新形態との関係を体系化したものであり、寿命概念と更新形態に関連して発生する構造物の性質をマトリックス形式で読みとることが可能となる。
- 5) コンクリート構造物へのライフサイクル設計の実装モデルは、明解な4段階の設計レベルにより構成されており、対応する4種類の構造用コンクリートは、今後の構造用コンクリートのあり方を方向づけるものである。
- 6) 材料保存性を確保するリサイクラブルコンクリートは、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であり、今後その実務的な使用が期待される。

第4章の参考文献

- [1] 梅田靖,インバースマニユファクチャリングフォーラム・ライフサイクル設計委員会:インバースマニユファクチャリングのためのライフサイクル設計ガイドライン(第1報)ーライフサイクル・オプションに対する基本的な考え方ー,エコデザイン 2000 ジャパンシンポジウム論文集,pp.13-16,2000
- [2] 産業構造審議会:循環型経済システムの構築に向けて,産業構造審議会地球環境部門,廃棄物リサイクル部会合同基本問題小委員会報告書,産業構造審議会,1999.
- [3] 日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事,1997
- [4] 住宅の品質確保の促進等に関する法律,日本住宅性能表示基準(住宅の性能に関し表示すべき事項及びその表示の方法の基準),2000
- [5] 平野吉信:海外の「性能指向の建築基準」の動向,建築研究成果撰あらか第12集,1994
- [6] 例えば,法量良二:住宅・都市基盤公団におけるゼロエミッション化,1999年日本建築学会大会(中国)材料施工部門研究協議会資料,pp.19-24,1999
- [7] 村松貞次郎:鉄筋コンクリート構造の歴史,コンクリート・ジャーナル,1968
- [8] セメント協会編:コンクリート技術変遷年表,セメント・コンクリート 500号,1989
- [9] セメント協会編:コンクリート構造物の50年
- [10] 伊東茂富,白山和久:材料における移り変りー骨材ー,コンクリート工学,Vol.18,No.11,1980
- [11] コンクリート工学協会編:400号特集・コンクリート温故知新,コンクリート工学,Vol.37,No.1,1999
- [12] 友澤史紀,野口貴文ほか:完全リサイクルコンクリート(エココンクリート)の研究,日本建築学会学術講演梗概集,pp.341-342,1994
- [13] 建設省:建設省総合技術開発プロジェクト,長期耐用都市型集合住宅の建設・再生技術の開発報告書,2000.
- [14] 建設省:スケルトン住宅って何ー長持ちする集合住宅づくりを考えるー,2000
- [15] 尾島俊雄監修:完全リサイクル型住宅Ⅱー未来開拓学術研究推進事業として[鉄骨造編],早稲田大学理工総研シリーズ18,早稲田大学出版部,2001
- [16] 田村雅紀: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 日経エコロジー, pp.53-56, 2001
- [17] 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
- [18] Shima, H., Tateyashiki, H., et al., "New Technology for Recovering High Quality Aggregate from Demolished Concrete", Proceedings of the Fifth International Symposium on East Asian Recycling Technology, The Mining and Materials Processing Institute in Japan, pp.106-109, 1999

