

論文 リサイクル設計を包含するコンクリート構造物のライフサイクル設計手法

田村 雅紀^{*1}・野口 貴文^{*2}・友澤 史紀^{*3}

要旨：鉄筋コンクリート造建築物を中心に見られる短寿命化現象を、構造体の性能低下等の技術的問題に加え、構造物の用途に応じた機能寿命の低下に因っても発生するものと捉え、構造物構成要素における本質的機能を抽出した上で、それらの制御を目的とする4種類の個別設計要素により構成されるライフサイクル設計手法を新たに示した。これにより構造物は、設計段階でコンクリート構成材料を品質低下がないまま構造用コンクリートに再利用するライフサイクル設計の導入が可能になり、構造物における閉じた系内での資源循環性を検討する条件が整う。

キーワード：リサイ클ラブルコンクリート, 材料保存性, ライフサイクル設計, 生産システム

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建築物における短寿命化の発生原因は、デザインの陳腐化、空間更新性の制約および躯体自身の性能低下等の技術的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、使用済製品の再利用を抑制するマーケットメカニズムや、技術と政策等との不適合性等の社会的要因の影響も否めない。循環型社会を目指す次世代においては、構造物のライフサイクルを想定した上で、社会的要因により構造物の機能寿命が低下する影響を踏まえた技術開発が必要である。ライフサイクル設計は機械系を中心とした他産業分野で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国際共同研究プログラム¹⁾や、IM生産システム²⁾などでライフサイクル設計の基礎概念を具体化している。一方、建設業ではライフサイクル設計に関連するものとして建築性能の規格化が挙げられ、国際的には建築生産プロセスにおける企画・設計・施工の契約段階における問題を扱うものとして、ISO9699にて建築性能規格である建築設計ブリーフ³⁾を示しており、国内においても生産の初期段階でのライフサイクル戦略を具体化する検討⁴⁾が実施され始めている。

以上、本研究では、コンクリートを閉じた系内で資源循環させる観点から、必要となる基礎概念、コンクリートの材料保存性⁵⁾を考慮したライフサイクル設計手法および新たに導かれる生産システムのあり方を具体的に示すことを目的とする。

2. ライフサイクル設計の前提条件

IPCC 報告書⁶⁾では、今後1990年から2100年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、地球の平均海面水位は0.09～0.88m程度上昇することが予測されている。これは、経済活動を可能とする陸地の減少に起因する従来型社会システムの持続性を危ぶむものである。しかし、海面水位上昇の影響を考慮したとしても、国内では従来の生産システムに基づく建設活動が数十年程度で困難になることは想定し難く、数百年は持続すると仮定した場合、構造物は少なくとも数回から数十回は更新されると考えられる。つまり、環境に配慮して構造物のライフサイクル設計を検討する場合、この更新回数に関する性質を考慮することが重要であり、解体処理を生産工程の一環に位置づけた方法が必要になると考えられる。

＊1 東京都立大学大学院 工学研究科建築学専攻・助手 博士(工学) (正会員)

＊2 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻・助教授 博士(工学) (正会員)

＊3 日本大学 理工学部建築学科・教授 工博 (正会員)

3. 研究概要

3.1 資源循環の基礎的概念

ライフサイクル設計を具体化する条件となる基礎的概念を表－1に示す。これはコンクリート材料の資源価値を考慮して概念化したものであり、公的機関等で定義化された環境関連用語(7),8),9)を考慮している。

3.2 順工程生産システム

資源循環の基礎的概念により建築生産システムのあり方が検討可能となる。順工程生産システムとは「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生産システム」と定義され、既存構造物の多くは順工程生産システムに基づいて生産されていると考えられるため、リサイクル技術は「設計時にリサイクルを考慮しない使用済み製品を再生する」概念に基づき、廃棄処分の代替手段としてリサイクルを実施しているとみなすことができる。これは対処療法的技術の典型であり、ダウンサイクリングによる循環を導く性質が予め内在しているといえる。しかしながら、順工程生産システムに基づく既存構造物は既に大量に蓄積しており、発生するコンクリート塊を何らかの手段で処理することが重要となる。幸い、再生品の要求性能が低く、需要が広範である場合は、需要消失までの一定期間は有効な手段として機能する場合も考えられ、路盤材などはその好事例として位置づけられる。

資源循環の基礎的概念を考慮した場合、既存構

造物から得られるコンクリート塊の再資源化手法は表－2のように分類することが可能となり、これを順工程生産システムによるコンクリート塊の Best Available Technology と位置づける。構成要素は、路盤材となる再生碎石①、低品質再生骨材により設計強度の上限や用途制限が設けられる非構造用コンクリート②③④、高品質再生骨材を用いた構造用コンクリート⑤⑥である。現在②

表－1 資源循環の基礎的概念

素材 (Raw Material)	将来的に製品部品になりうる物質により構成され、製品の部品化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、製品部品とすることを目的とした処理が施された物質。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、解体分離後に品質・性能の低下を生じずに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、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)を再生製品の部品に使用する場合、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)を再生製品の部品に使用する際、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・部品の更新を行なう場合、廃棄要素・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・部品の更新を行なう場合、廃棄・新規投入要素が発生せずに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

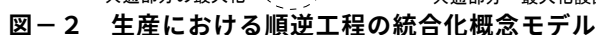
表－2 順工程生産システムを起源としたコンクリート塊の再資源化方法

循環形態	更新形態	製品レベル	再生骨材品質		適用概要				
			粗骨材	細骨材	構造材	非構造材	充填材	特別処理	用途事例
オープンループ	ダウンサイクル	①再生碎石	低品質骨材	低品質骨材	×	×	○	---	路盤材 埋め込み材など
		②低品質コンクリート1	低品質骨材	低品質骨材	×	○	△	---	捨てコンクリートなど
		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 重力式擁壁など
		④低品質コンクリート3	高品質骨材	低品質骨材	×	○	△	---	橋梁下部工 擁壁など
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)	○	○	△	高品質再生骨材 製造システム (機械すりもみ式)	鉄筋コンクリート造 構造物
		⑥高品質コンクリート2	高品質骨材	高品質骨材	○	○	△	高品質再生骨材 製造システム (加熱すりもみ式)	鉄筋コンクリート造 構造物

図-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資源循環系を示す。これは既存コンクリート構造物を起源とする物質循環の概念モデルである。構造物のみによりクローズドループは構築されず、非構造成用コンクリート材料、充填材にダウンサイクルされ、循環形態がオープンループ化ようになる。

順逆工程統合生産システムは「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」と定

図-2に順逆工程の統合化概念モデルを示す。他産業分野の製品と相違する建築物の特徴として、建築構成要素である部材・材料等は「物質性能」に、建築物を構築するための製造・施工の人為的行為は「形而上的性能」¹⁰⁾に置き換え、その全体の性能が規定されることが挙げられる。これを考慮し、分解組立性設計における共存設計最小化¹¹⁾の考え方の応用を試みる。分解組立性設計では、分解性と組立性が比例関係にあり、分解容易性設計を行うと組立性も容易になるという共通設計、分解性と組立性が反比例の関係にあり分解(組立)容易性設計を行うと組立性(分解性)が困難になる共存設計が存在し、後者の最小化により合理的な分解組立性能が得られるとしている。a) 順工程生産システムでは設計段階で構成材料の



分解性を考慮しないため、形而上的性能に分解性能は包含されない図式となる。これに対し、分解性を後から付加する b)逆工程付加型一順工程生産システムは、設計段階で考慮しない形而上的性能の分解性をシステムに導入するため、再資源化段階のエネルギー負荷は必然的に増大する。c)順逆工程統合生産システムでは、設計段階でコンクリートの骨材－ペースト間の分解性等を予め確保するため、分解と組立が共通工程で実行されるようになり、分解組立性能の向上に伴う資源循環性に優れるコンクリートとなる。

3.4 構造物のライフサイクル設計手法

ライフサイクル全般に要求される所要性能を保持し続けられ、構造物としての本質的価値は低下せず半永久的に使用され構成材料の材料保存性も確保されるといえる。ライフサイクル設計手法は、構造物の長寿命化とコンクリート構成材料の資源循環性を充足した上で最終的に順逆工程統合生産システムを導くことを目標としているが、このためにはコンクリート構造物に必要とされる本質的機能を明確にすることが重要となる。

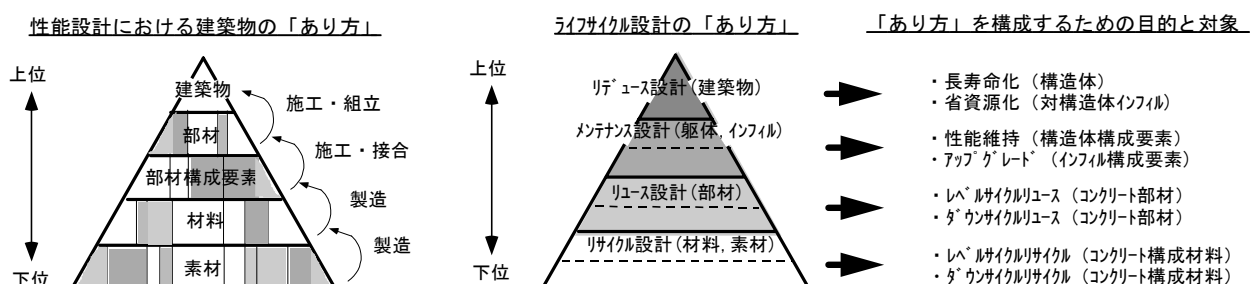
表－3 に建築構成要素の本質的機能と個別設計要素を、図－3 に個別設計要素によるライフサイクル設計のヒエラルキーを示す。建築構成要素のヒエラルキーは NKB Level System¹²⁾ を基に検討さ

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、建築物という形で構成される。そして資源循環性を考慮した場合、各要素の本質的機能は8種類に分類でき、その機能を構造物中で充足させるための機能導入手法として4種類の個別設計要素が導かれる。「建築物、部材要素」の本質的機能は①②であり「リデュース設計」を、「建築物、部材、部材構成要素」の本質的機能は③④であり「メンテナンス設計」を、「部材構成要素、材料」の本質的機能は⑤⑥であり「リユース設計」を、そして「材料、素材」の本質的機能は⑦⑧であり「リサイクル設計」を導くことができる(表－3 参照)。これらの個別設計要素によりライフサイクル設計のヒエラルキーが構成される。また表－4 の本質的機能を反映した8種類の「設計目的」が導かれ、設計目的の対象である「基本構成要素」を定めることで更新後の再利用方法も具体的にすることができる。

ライフサイクル設計手法の大きな特徴は、その設計要素に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」が予め導入される点に集約される。また構造物の「基本構成要素」の具体化により、更新後の最適な利用方法のあり方が明確にされることも特徴といえよう。

表－3 建築構成要素に要求される本質的機能と個別設計要素

建築構成要素	本質的機能	個別設計要素
建築物および部材	①耐久性が確保され、長寿命化につなげるための機能 ②初期および更新時における資源投入量が低減させる機能	リデュース設計
建築物、部材および部材構成要素	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す機能	メンテナンス設計
部材、部材構成要素および材料	⑤更新による品質低下がなく、再生部材として使用可能にする機能 ⑥更新による品質低下を許容した上で、再生部材として使用可能になる機能	リユース設計
材料および素材	⑦更新による品質低下がなく、再生材料として使用可能にする機能 ⑧更新による品質低下を許容した上で、再生材料として使用可能になる機能	リサイクル設計



図－3 個別設計要素によるライフサイクル設計のヒエラルキー

表－４ ライフサイクル設計により導かれるコンクリート構造物の特徴

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・スラブ、 鉄筋コンクリート壁・床など	左に同じ
			2. 省資源化	対構造体 インフィル	動線設備、空調設備、 電気系設備など	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・梁部材、 非構造壁、二次部材など	左に同じ
			4. アップグレード化	インフィル 構成要素	個別空調設備 個別給湯設備など	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・梁部材 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
			6. ダウンサイクルリユース化			非構造壁 二次部材など
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 粉体系材料

備考) 個別設計要素(4種類)と本質的機能を満たす設計目的(8種類)により構造物の所要性能および特徴が明確になる。

表－５ 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	破砕条件	種類	主な用途
Level 1	●	●	●	---	骨材選定 骨材改質処理	再生化处理 (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 2	●	●	●	●	---	再生化处理 (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 3	●	●	---	●	---	再生化处理 (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 4	●	●	---	---	---	簡易処理	④廃棄型 コンクリート	廃棄処分

3.5 ライフサイクル設計手法の実装モデル

ライフサイクル設計手法の実装を試みる。現状のコンクリート構造物に要求される環境側面を抽出すると、第1に天然資源の稀少性と環境破壊の顕在化に起因して省資源化対応を図った上で構造躯体を永続的に使用すること、第2に最終処分場残余量の切迫により、コンクリート塊の路盤材としての需用が消失した段階で構造用コンクリートとして再資源化することが挙げられ、それらを設計条件に優先的に考慮したライフサイクル設計を行うことが必要になるといえる。

続いて、個別設計要素と設計目的の組み合わせにより得られる設計レベルを特定する。第1の条件を充足するために、「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」の設計目的を選定する。第2の条件を充足するためには、「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」を選定する。

なおリサイクル設計においては、「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「最終処分」が部分的に発生する可能性が考慮されるため、それらも含めて最終的に4つの設計レベルが特定される。

表－５にライフサイクル設計の実装モデルを示す。4段階の設計レベルにおいて、構造物のリサイクル条件や製品の特徴などが予め決定されるようになる。Level 1の構造物は、再生材料の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できる省資源対応ー長寿命化設計が適用され、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るために、再び構造用コンクリート再生骨材やセメント原料が製造できる①レベルサイクルコンクリートとして成立する。Level 2の構造物は、高度処理により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できる省資源対応ー寿命考慮型設計が適用される②レベルサイクルコンクリートとして成立する。Level 3の構造物は、簡易処

理により用途制限がある状態で再利用される省資源対応一寿命考慮型設計が適用され、解体・処理後には低品質再生骨材や路盤材として再利用される③ダウンサイクルコンクリートとして成立する。最後に、Level 4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一寿命考慮型設計が適用されるため、解体処理後には最終処分される④廃棄型コンクリートとして成立する。このように設計レベルに対応した構造物の所要性能と更新のあり方が特徴づけられるといえる。

図-4に実装モデルによるコンクリート構造物のライフサイクルを示す。①のレベルサイクルコンクリートによる構造物は、ライフサイクルが途切れずに世代を越えて存在し続けられると想定され、表-6に示すような材料保存性を考慮したリサイクラブルコンクリートが必要となる。同コンクリートは、再資源化段階で簡便な処理により、その全量が骨材もしくはセメント原料として再び構造成コンクリートに利用することが期待できるため、クローズドループによる循環形態の確保を可能にするものといえる。

4. まとめ

本研究で示すライフサイクル設計手法は、コンクリート構造物の本質的機能が考慮されており、8種類の設計目的に基づく4種類の個別設計要素により構成される。そして設計段階において、閉じた系内でコンクリート構造物における構成材料の資源循環を可能にするリサイクル設計を導入する結果、生産の順工程と逆工程を統合した順逆工程統合型の生産システムを導くことも期待できるようになる。

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：インバースマニユファクチャリング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

- ①Level 1: レベルサイクルコンクリート (順逆工程統合生産システム)
- ②Level 2: レベルサイクルコンクリート (逆工程付加型一順工程生産システム)
- ③Level 3: ダウンサイクルコンクリート (順工程生産システム)
- ④Level 4: 廃棄型コンクリート (順工程生産システム)

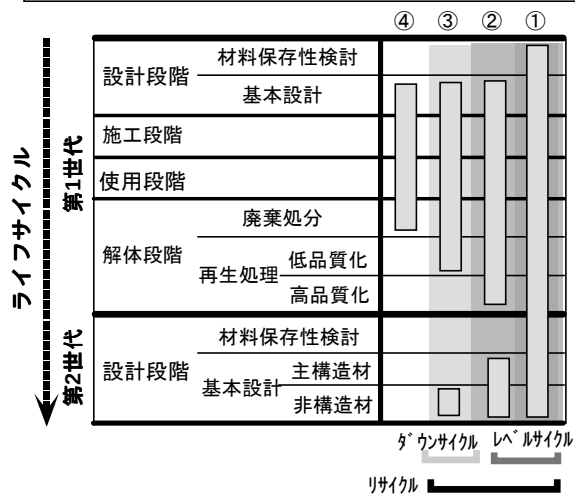


図-4 実装モデルによる構造物のライフサイクル

表-6 材料保存性のあるリサイクラブルコンクリート

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

- 5) T. Noguchi and M. Tamura, Concrete Design toward Complete Recycling, Structural Concrete, journal of the fib, Vol.2, No.3, pp.155-167, Sep.2001
- 6) IPCC Third Assessment Report(TAR), Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001
- 7) ISO14040-97 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework
- 8) ISO14050-98 Environmental management - Vocabulary
- 9) ISO 8930-87 General principles on reliability for structures - List of equivalent terms
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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