

委員会報告 コンクリート構造物の環境性能に関する研究委員会

堺 孝司*1・野口 貴文*2・河合 研至*3・鹿毛 忠継*4・大脇 英司*5

要旨:「コンクリート構造物の環境性能に関する研究委員会」では、コンクリートの生産活動およびコンクリート構造物の建設活動によって生じる環境負荷の低減を促進させることを目的として、4つのWG（技術WG、評価WG、最適化WG、施策WG）を設け、コンクリートに関わる環境性能向上技術の研究・開発の現状調査、既往の環境影響評価ツールの現状を踏まえたコンクリート構造物の環境性能評価ツールの開発、コンクリート構造物の建設・解体等による環境負荷最小化のための最適化問題の検討、およびコンクリート構造物に関わる環境側面の現状に基づく効果的な環境負荷低減施策の提言を行った。

キーワード: 環境負荷, CO₂, 廃棄物, ライフサイクル, 評価ツール, 最適化, 施策

1. はじめに

コンクリートは、人間の社会経済活動のための基盤として欠くことのできない重要な建設材料である。コンクリートがネガティブに表現されることも少なくないが、それはその本質を理解していないと言わざるを得ない。地球上の資源を最も効率的に利用しているのがコンクリートであると言えるが、その使用量は膨大である。正確な統計データはないが、現在のセメント生産量が世界で約20億トンであるとする、コンクリートとしては、100億トンは優に超える生産量になる。これが、今後数倍に膨れあがることが予想されている。

一方、近年、地球温暖化が深刻な国際政治問題となってきた。2008年から京都議定書の履行約束期間に入り、今後5年間、先進諸国は温暖化ガスの削減義務を負うことになる。しかし、京都議定書での削減義務である、1995年比で平均約5%の数値そのものに実質的な意味は無い。何故なら、IPCCの第4次報告書によれば、地球の平均気温を産業革命から2~2.4℃以内に抑制するためには、2050年におけるCO₂排出量を2000年比で85~50%削減する必要があるからである。しかし、人類

が温暖化ガスを削減することを決意した意味において、京都議定書発効は人類史上重要なエポックであった。

前述したように、建設・コンクリート分野は、膨大な資源とエネルギーを使用している。その結果である地球温暖化等の環境負荷も少なくない。今後の発展途上国の社会経済活動の拡大を考慮すれば、これらの利用効率を著しく高めることが必須である。しかし、建設・コンクリートセクターは、その現状を客観的に評価できる状況にはないし、環境負荷を削減する統一的なシステムを有しているとも言えない。このような背景に基づいて、本研究委員会では、将来、コンクリートに関わる環境負荷の低減を促進させることを目指し、表-1.1に示すように、既往の環境影響評価ツールの現状を踏まえたコンクリート構造物の環境性能評価ツールの開発（評価WG）、コンクリートに関わる環境性能向上技術の研究・開発の現状調査（技術WG）、コンクリート構造物の建設・解体等による環境負荷最小化のための最適化問題の検討（最適化WG）、およびコンクリート構造物に関わる環境側面の現状に基づく効果的な環境負荷低減施策の提言（施策WG）を行った。

表-1.1 委員会名簿

委員長	堺 孝司	評価WG	技術WG	最適化WG	施策WG
幹事代表	野口貴文	主査 鹿毛忠継	主査 河合研至	主査 野口貴文	主査 大脇英司
幹事	鹿毛忠継	委員 有川 智	委員 伊藤康司	委員 兼松 学	委員 片平 博 原田健二
幹事	大脇英司	木元明日子	岡本 大	堺 孝司	河野広隆 久田 真
幹事	河合研至	川西泰一郎	神代泰道	島 裕和	小西正芳
		黒田泰弘	堺 孝司	柳橋邦生	堺 孝司
		堺 孝司	佐々木肇		曾根真理
		松村卓郎	佐野 奨		田村雅紀

*1 香川大学 工学部安全システム建設工学科教授 工博（正会員）

*2 東京大学 大学院工学系研究科建築学専攻准教授 工博（正会員）

*3 広島大学 大学院工学研究科社会環境システム専攻准教授 工博（正会員）

*4 （独）建築研究所 建築生産研究グループ上席研究員 工博（正会員）

*5 大成建設（株） 技術センター技術企画部 工博（正会員）

2. 環境性能向上技術の現状（技術 WG）

2.1 文献調査

(1) 調査内容

環境に配慮した取組みあるいは環境負荷低減に資する取組みを環境性能向上技術と位置付け、その中でも汎用性が期待でき、一般的に普及可能な技術について調査・整理することを目的として、文献調査を実施した。文献調査は、FS 委員会時（2005 年度）と本委員会時（2006～2007 年度）のそれぞれで実施した。対象とした文献は、国内外の学協会組織ならびに出版社において公表された雑誌ならびに国際会議プロシーディングスの中から、コンクリートの環境側面に関する研究および技術が紹介されていると考えられたものである。FS 委員会時では 1995～2005 年に発表された文献を、本委員会時では 2005～2007 年に発表された文献を調査した。

具体的には、各文献で説明されている(a)対象としているライフサイクルの段階と、(b)当該技術が果たす

表-2.1 調査文献の分類（(a)ライフサイクルの段階）
（FS 委員会時）

1	セメント	—製造段階
2	骨材	—製造段階
3	化学混和剤	—製造段階
4	混和材	—製造段階
5	鉄筋	—製造段階
6	型枠	—製造段階
7	コンクリート	—製造段階
8	コンクリート構造物	—施工段階
9	コンクリート構造物	—維持保全段階
10	コンクリート構造物	—解体段階
11	解体コンクリート	—再生処理段階
12	解体コンクリート	—廃棄処分段階
13	環境影響の評価段階	
14	その他	

（本委員会時）

1	設計段階	環境影響の評価段階
2	材料製造段階	セメント製造段階
3		骨材製造段階
4		化学混和剤製造段階
5		混和材製造段階
6		鉄筋製造段階
7		型枠製造段階
8		コンクリート製造段階
9		リサイクル材使用段階
10	施工段階	
11	供用段階	
12	維持保全段階	
13	コンクリートの解体・処理段階	解体段階
14		再生処理段階
15		廃棄処理段階
16	その他（長寿命化、環境性能向上技術等）	

る環境負荷低減要因（環境影響要因）を、あらかじめ分類した項目の中から適宜選定するとともに、(a)および(b)の 2 つの視点に着目した概要を整理した。表-2.1 および表-2.2 にそれぞれ(a)ライフサイクルの段階および(b)環境影響要因の分類を示すが、FS 委員会時と本委員会時では、項目(a)の分類内容が若干異なっている。

(2) 調査結果

(1)に示した内容により調査した文献は、FS 委員会時で国内 791 件、海外 300 件（海外研究者の発表分は 229 件）、本委員会時で国内の文献 240 件となった。

ここでは例として、本委員会時の調査結果について、ライフサイクルの段階別、環境影響要因別の研究報告頻度を図-2.1 に示す。

表-2.2 調査文献の分類（(b)環境影響要因）

1	地球温暖化
2	オゾン層破壊
3	酸性化
4	天然資源枯渇
5	大気汚染
6	水質汚染
7	土壌汚染
8	騒音
9	振動
10	粉塵
11	空気質汚染
12	最終処分
13	その他

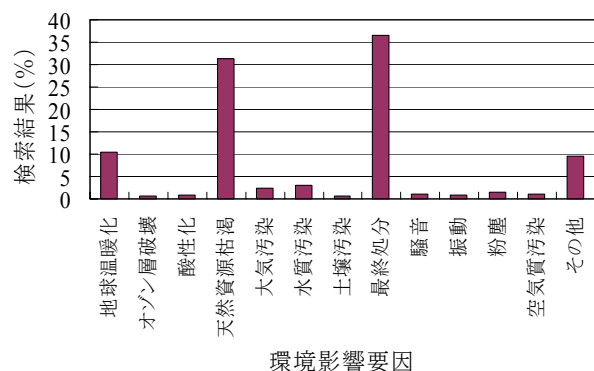
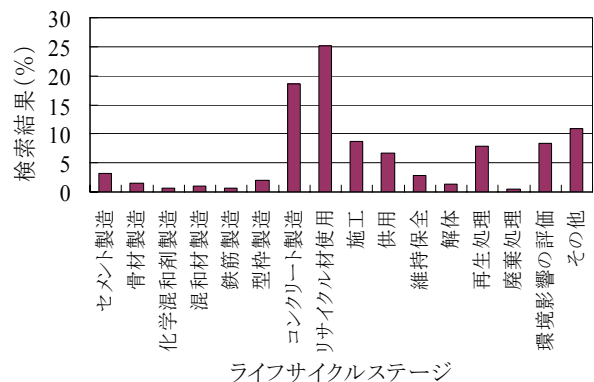


図-2.1 文献調査結果

ライフサイクルの段階別でみると、リサイクル材使用段階が最も多く、次いでコンクリート製造段階となっている。FS 委員会時では分類そのものが異なっているが、やはりコンクリート製造段階と解体コンクリートの再生処理段階の頻度は高く、傾向は同じであった。

一方、環境影響要因別では、地球温暖化、天然資源枯渇、最終処分が大半を占め、FS 委員会時でも同じ傾向である。国内と海外を比較すると、最終処分に関連する研究報告が国内では高く、処分場の逼迫など国内の事情が反映されていると考えられる。

また、最近では、セメントの製造や混和材の製造段階に関する研究が減少する傾向が見られた。この分野に関する研究は、産業副産物の使用に関するものが多く、現在では、エコセメント等 JIS 規格に制定されているものもあり、研究の成果が実用化されたことに起因していると考えられる。

なお、多くの研究は、その中で対象としている技術の環境側面へのプラス効果のみを評価しており、環境負荷低減効果を定量的（総合的）に評価しているものは少ない。個々の技術開発について、総合的な環境負荷低減効果を評価することが今後の課題であろう。

2.2 アンケート調査

(1) 調査内容

コンクリートに関連する国内各社における環境負荷低減技術の現状を把握し、課題点あるいは将来展望を分析評価することを目的として、アンケート調査を実施した。アンケート用紙は、発注者、材料メーカー、施工者など合計 140 社に送付し回答を依頼するとともに、JCI のホームページ上および会誌会告で回答を募集した。アンケート項目を表-2.3 に示す。

(2) 調査結果

アンケートに対し、20 社 26 件の環境負荷低減技術について回答が寄せられた。

ライフサイクルの段階では、リサイクル材使用段階、施工段階、コンクリート製造段階およびコンクリートの再生処理段階の技術が多く、化学混和剤製造段階、混和材製造段階および型枠製造段階に属する技術の回答は見られなかった。この理由として、化学混和剤製造段階においては、通常の製品においてリサイクル原料が使用されているため、改めて環境負荷低減技術としては取り扱われていない、さらに、混和材製造段階では、ほとんどの製品がリサイクル材であり、新規に資源を消費して製造した製品がほとんどないためであると考えられる。型枠製造段階では、新規技術開発の要素が少ないものと推察される。

対象とする環境影響要因では、天然資源枯渇、最終処分および地球温暖化が多く、また環境影響に対する

表-2.3 アンケート項目の内容

1	環境負荷低減技術の名称
2	技術の提供者（企業名、出典、開発時期）
3	対象とするライフサイクルの段階（分類は表-2.1の本委員会時に同じ）
4	対象とする環境影響要因（分類は表-2.2に同じ）
5	環境影響に対する評価項目（エネルギー消費量/CO ₂ 排出量/NO _x 排出量/SO _x 排出量/ばいじん排出量/廃棄物発生量/資源リサイクル量/その他）
6	貴機関が利用した評価方法（積上げ法/産業連関法/LIME/CASBEE/その他）
7	環境負荷低減技術の概要
8	環境影響に対する貴機関の評価結果
9	問合せ先
10	この技術は法規制と関わりますか？関わる場合には、その法規類の名称と適合性について記述ください
11	この技術の普及度合いを以下から選択ください（施工実績がある/試験施工を実施した/開発段階である）
12	この技術を発表された関連文献がありましたら、記入ください
13	この技術の普及に対する阻害要因がありますか？あると思われる場合には、それを記述ください
14	以下について該当がありましたら、記号・番号等を記入ください（NETIS 登録/特許（実用新案）登録/その他（グリーン調達品目指定・エコマーク・エコリーフなど）
15	環境負荷低減技術の詳細
16	環境影響に対する貴機関の評価結果（詳細）

評価項目では、廃棄物発生量、資源リサイクル量および CO₂ 排出量が多い結果となった。現状における環境問題への取組みとしては、資源循環と CO₂ 排出抑制に関わる取組みが集中的に行われていることが示された。

なお、環境負荷低減技術の普及に対する阻害要因として、廃棄物発生時期とリサイクル材料の使用時期のずれ、需給のバランスがとれていないことなどが挙げられた。さらには、リサイクル材料に対する過剰な品質要求という意見も出されていた。

2.3 今後の課題と展望

文献調査、アンケート調査を通じ、国際的に喫急の課題となっている資源循環と CO₂ 排出抑制が、現在の環境負荷低減技術の中心となっている点は、やむを得ないところであるが、資源循環を推し進めるがために長距離輸送がなされ環境負荷が膨大となることがないよう留意しなければならない。また、総じて、包括的、総合的な定量評価は行われておらず、これらの取組みが今後の課題となろう。

現状の技術の活用、また、さらなる開発を今後飛躍的に実施していくためには、行政主導による、環境負荷低減への動機付けが必要であるように感じられる。

3. コンクリート構造物の環境性能評価ツールの開発 (評価 WG)

3.1 環境性能評価ツールの開発にあたって

既往の環境負荷評価ツール等について調査し、それらの特徴や適用性に関する分析・整理とコンクリート構造物の環境性能評価ツール作成のための前提条件やシナリオについて検討を行うとともに、コンクリート構造物のライフサイクルやマテリアルフロー（材料製造～コンクリート製造～施工～維持保全～リサイクルおよび輸送）を詳細に整理し、環境性能（CO₂ 排出量等）を評価（算出）するためのツール（プロトタイプ）を提案することを目的として活動した。

3.2 既往の評価ツールの調査

構造物の環境負荷の評価ツールは、国内および国外においていくつか提案されているものがある。以下に調査を行った代表的な既往の環境負荷評価ツールを示す。なお、国外の評価ツールのまとめにあたっては、既往の文献ならびに関連ホームページなどを参考にした。

(1) 国内の評価ツール

代表的なものとして、①CASBEE（国土交通省+産官学共同）、②LIME（産総研）、③建物の LCA 指針（日本建築学会）、④LCC 計算プログラム（建築保全センター）、④BEAT（建築研究所）、⑤LCW 算出ツール（SB 総プロ）等を対象に調査を行った。

(2) 国外の評価ツール

代表的なものとして、①BREEAM（Building Research Establishment Environmental Assessment Method）、②BEPAC（Building Environment Performance Assessment Criteria）、③ C-2000 Advanced Commercial Building Program、④Energy Star Building Program、⑤ LEED（Building : Leadership in Energy and Environmental Design）、⑥The City of Austin's Green Building Program、⑦ BEES（Building for Environmental and Economic Sustainability）、⑧ Eco-Quantum、⑨ GBTool（Green Building Tool）、⑩NABERS（the National Australian Built Environment Rating System）、⑪ESGB（Evaluation System for Green Buildings）、⑫ SPeAR（Sustainable Project Assessment Routine）等を対象に調査を行った。

(3) 既往の評価ツールからの留意事項の抽出・分析

上記調査結果の概要を述べると、これらの既往の評価ツールには構造物の設計～施工～維持・保全といったライフサイクルを通しての総合的評価を目指しているものが多く、評価項目については使用材料・室内環境・地球環境・省エネルギーなど多岐にわたっており、その枠組み・考え方等は参考になる。しかし、コンクリート構造物の設計や施工に特化した評価ツールはな

いのが現状である。そのため、評価ツールの提案にあたっては、コンクリート構造物のライフサイクルやマテリアルフロー（材料製造～コンクリート製造～施工～維持保全～リサイクルおよび輸送）を詳細に整理することから実施し、各ライフサイクルステージにおける評価項目を抽出し、それらを使用・製造する場合の CO₂ 原単位やエネルギー使用量を算出することで、評価対象とするコンクリート構造物の想定したライフサイクルに応じた環境負荷を算出できるものを目標とした。

3.3 評価ツールの提案

(1) 評価ツールの検討にあたっての基本的考え

- ①コンクリート構造物のライフサイクルを考えるにあたって、「原材料の採取・製造」、「（コンクリート使用）材料」、「コンクリート製造」、「施工」、「供用期間」、「維持・保全」、「リサイクル（解体）」、「輸送」に区別する。
- ②各ライフサイクルステージにおいて、評価すべき項目を抽出し、必要数量×CO₂ 原単位（エネルギー使用量も CO₂ に換算）により、CO₂ 排出量を計算させる。なお、計算にあたっては、スプレッドシート上にある評価項目を選択し、数量入力を行うことで、CO₂ 排出量を積算する方式とした。
- ③「輸送」については、輸送手段・移動距離を確定し、関連するシートへ材料等を引き渡す場合に、CO₂ 排出量として考慮・加算される。
- ④使用する際に必要なバウンダリの設定については、設計者・使用者が実施する。なお、バリエーションとして、「基本設計」、「詳細設計」、「実施設計」に使用されることを想定し、「基本設計」の場合は、使用される各シートにおいて、CO₂ 原単位は「デフォルト値」で与え、CO₂ 排出量が計算できるようにする。
- ⑤使用する CO₂ 原単位等のインベントリデータは、3.2 において調査した既往の評価ツールにおいて使用されたものを精査し引用することとした。なお、評価項目によって不明な場合は、空欄とする。
- ⑥供用期間の CO₂ 排出やエネルギー消費量の評価については対象外とし、既往の評価ツールの使用を前提とした。

(2) 各評価シートの概要

①材料シート

- ・ セメント、骨材（天然、人工、再生）、混和材・剤等を製造するための原材料ごとに CO₂ を積算する。
- ・ 材料の製造にあたっての CO₂ 排出量の算出は、材料シートにより行うが、「原材料の採取・製造」における CO₂ 排出量とその輸送に伴う CO₂ 排出量は、材料シート中の原材料の原単位に加算される。

②コンクリート製造シート

- ・ コンクリート製造のための配合表を用意する。
- ・ コンクリート使用材料の CO₂ 原単位は、基本的に①材料シートから算出されたものが引用される。
- ・ 生コン工場で製造される「レディーミクストコンクリート」の使用を前提とし、現場練りは考慮しない。なお、PCa 部材の製造については、ここで評価する。
- ・ 配合表を決定するにあたっては、コンクリートの要求性能からその発注すべき品質（強度，スランプ（フロー），空気量）を決める必要があり，それに伴うコストも算出される。また，そのためには「生コン工場の選定」とそれに伴う「輸送」についても考慮される必要がある。本来，これらの「設計」行為も含めた形で，評価ツールの作成を考えたが，ここでは「範囲外」とし，与えられた配合によって CO₂ 排出量を算出する。そのため，使用する「生コン工場は既に特定された」ものであることが前提となる。

③施工シート

- ・ 工事種別（コンクリート工事，PCa 工事，鉄筋工事，鉄骨工事，型枠工事等）に投入される材料・機器類を項目として抽出し，材料については，①材料シートあるいは②コンクリート製造シートから CO₂ 原単位が引用される。機器類については，使用されるエネルギーを CO₂ 換算した原単位を使用する。

- ・ 「PCa 工事」に関しては，取り付け工事の評価とする。

⑤維持・保全シート

- ・ 設計により決まる改修期間（間隔）を設定する。
- ・ 改修期間に予想される補修・改修工事と使用される補修材料・機器類の種類を抽出。
- ・ CO₂ 原単位が不明な部分が多いと考えられるが，分かる範囲で原単位を抽出する。

⑥リサイクルシート

- ・ コンクリート構造物躯体の解体における使用機器類と解体後に発生する再生材料を抽出する。
- ・ 再生材料ごとに，CO₂ 原単位の整理を行う。
- ・ 再生材料は，①材料シート上の「再生材料」CO₂ 原単位に反映される。

⑦輸送シート

- ・ 使用される輸送手段ごとに，移動距離×CO₂ 原単位により，CO₂ 排出量を算出する。

3.4 まとめ

提案した評価ツール改善のための課題としては，不足しているインベントリーデータの精査や実際の建築構造物や土木構造物等の多くの適用例での検証が必要である。また，コンクリート構造物の環境性能以外の要求性能も包含した真の性能設計手法の確立を目指したコンクリートセクターとしての取り組みも必要である。

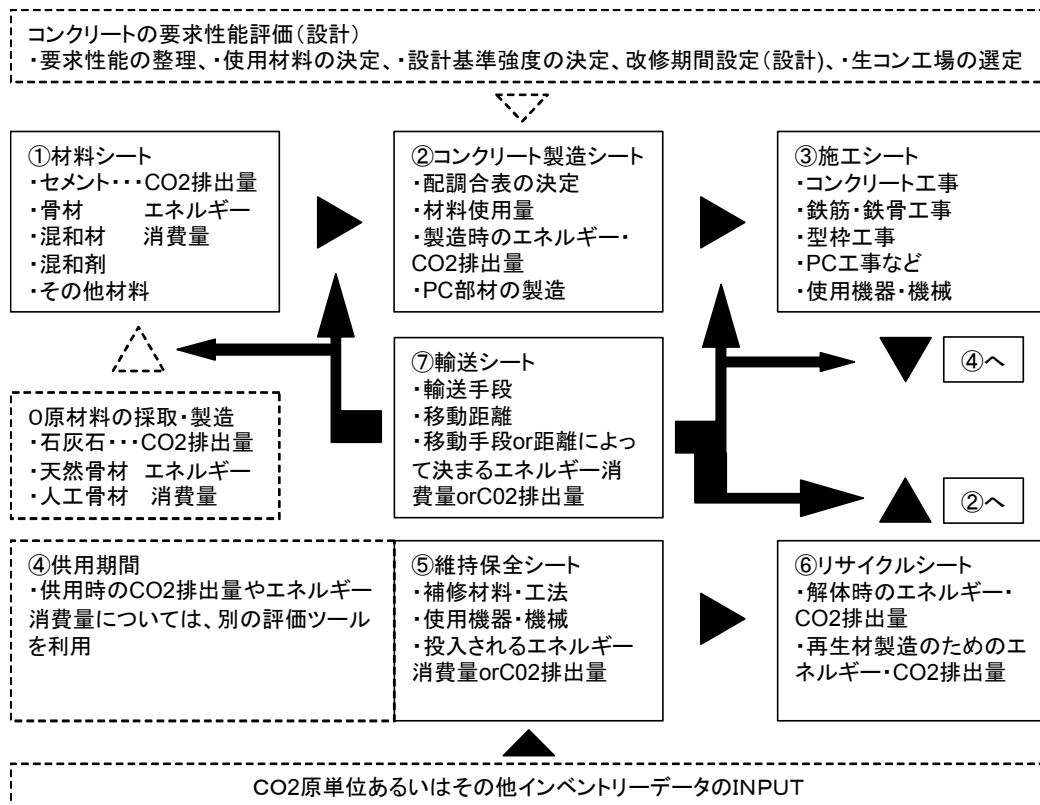


図-3.1 想定したコンクリート構造物のマテリアルフローの概略と評価内容

4. 環境配慮における最適化（最適化WG）

4.1 環境問題における最適化の意義

環境負荷低減技術の多くは、ある側面に関しては環境負荷を低減するものであるが、総合的な観点から環境負荷低減に資するかどうかは不明なものが多い。それは、コンクリート構造物の寿命が他産業の製品等に比べて極めて長く、他産業からの廃棄物受入先として期待されるなど、コンクリートに関連する環境問題は時間的・空間的な広がりやを考慮する必要があるにもかかわらず、現実社会の複雑さゆえに、それらへの十分な配慮がなされていないからである。また、地域ごとに異なる法令・制度・商習慣があり、様々な方針を有する企業が混在しているのが実社会である。したがって、図4.1に示される地域的な広がりや時間的な重なりを有する複雑な実社会¹⁾において、コンクリート構造物の建設関連活動に関して、長期的かつ広域的な視野で複数の要求を同時に満足できる最適な個別要素技術および総合的な最適環境配慮技術を示すことができれば、環境問題の解決に大いに資することが可能である。以上を踏まえて、最適化システムWGでは下記の活動を実施した。

- (1) 最適解（意志決定原理）の調査
- (2) 最適解導出手法の調査
- (3) 環境評価に関する統合化評価手法の調査
- (4) 課題の最適化問題としての記述方法の検討
- (5) 最適解導出に関するケーススタディ

4.2 最適化問題とは

最適化問題とは、数学的には特定の集合上で定義された関数について、関数値が最大／最小となる状態を解析する問題である。複数の基準を考慮しながら行う意思決定行為は多基準最適化問題と呼ばれ、工学的・社会的・数学的研究対象として古くから研究が進められてきている。最適化の目標となる関数を目的関数と呼び、目的関数の数と得られる最適解の意味に応じ

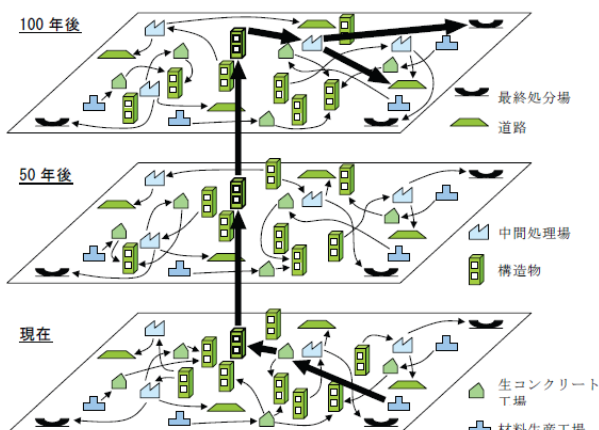


図-4.1 地域的・時間的な重層社会における資源循環¹⁾

て、最適化手法は下記のように分類できる。

(1) 目的関数が一つの場合

n 次元 Euclid 空間内の閉集合 C に属する変数 $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ を m 個の制約条件 $g_j(x)$ 下で、目的関数 $f(x)$ が最大／最小となるように定める。

(2) 目的関数が複数の場合

n 次元 Euclid 空間内の閉集合 C に属する変数 $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ を m 個の制約条件下で、 k 個の目的関数 $f_i(x)$ の全てが可能な限り大きく／小さくなるように定める。複数の評価基準に基づく最適解を定義するために、下記のような解の制限・縮約が行われる。

a) パレート最適解

パレート最適解は、ある目的関数の値を改善するためには少なくとも一つの目的関数値の改悪も許容する解の集合として定義され、 $x^*=(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ が制約条件 $g_j(x^*) \leq 0$ を満たし、 x^* に優越するような x が存在しないような x^* がパレート最適解であり、解は唯一とは限らず、図4.2のような解集合となる場合も多い。

b) ナッシュ均衡解

ある条件下において複数の企業が競争して生産活動を行う場合、ナッシュ均衡解は、どの企業も自分の戦略を変更することによってより高い利得を得ることができない戦略の組合せとなる。ナッシュ均衡下では、どの企業も戦略を変更する誘因を持たない。

c) 重み係数を用いた最適解

重み係数法とは、各目的関数の重み付き総和を単一の目的関数としてスカラー化することで、一般的な単一関数の最適化問題に変換する手法である。

$$\text{目的関数: } f_w(x) = \sum_i w_i \cdot f_i(x) \quad (i=1,2,\dots,k)$$

選好関係を十分に反映させた重み付き目的関数の合理的な決定は困難である場合が多く、重み係数 (w_i) の同定手法について十分な検討が必要である。

・AHP法（階層分析法）

多基準評価の観点と「重み」の定量的認識を原理とする意思決定モデルの一つであり、意思決定問題を階層構造として分析し、選ぶべき代替案の優先順位を効果的に決定することを支援するため

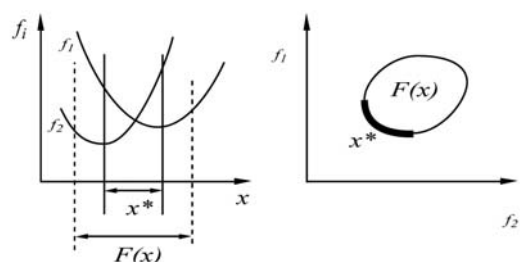


図-4.2 2目的関数・1変数でのパレート最適解集合

の方法である。

・コンジョイント分析法

消費者・顧客の商品やサービスに対する選考順位データを用いて、商品やサービスなどの選択対象の持つ属性ごとの効用と選択対象に対する全体効用を求める手法である。

d) 制約法に基づく最適解

制約法とは、j 番目の目的関数のみに注目し、他の目的関数を全て制約条件として扱うことでスカラー化する手法である。すなわち、j 番目以外の目的関数には上限値/下限値 a_i ($i=1,2,\dots,k,i\neq j$) を設けて、不等式制約下での最適化問題に変換する。

目的関数： $f_j(x)$
 制約条件： $g_j(x) \leq 0$ ($j=1,2,\dots,m$)
 $g_{ci}(x) \leq a_i$ ($i=1,2,\dots,k; i \neq j$)

4.3 最適解導出手法

(1) 総当たり法

総当たり法は、解空間 C に属する変数 $x=(x_1, x_2, \dots, x_m)$ と同一空間または別空間 D の異なる変数 $y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ の組合せ全てを目的関数に代入し、最大化/最小化する手法である。変数の組合せは 2 変数で $m \times n$ 通りあり、組合せの数だけ目的関数を評価する必要がある。

(2) 線形計画法

線形計画法は、線形である目的関数 $f(x)=c_1x_1+c_2x_2+\dots+c_nx_n$ を $a_{m1}x_1+a_{m2}x_2+\dots+a_{mn}x_n \leq b_m$ および $x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$ といった線形関数の不等式および非負条件を制約条件として、最大化/最小化することである。

(3) 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズムとは、生物の進化のメカニズムに着想し、工学的な問題を制約条件と目的関数に問題に対する解候補を遺伝子と呼ばれるバイナリ情報に置き換え、交配・淘汰・突然変異と呼ばれる操作を加えることで、問題に対するより良い解を得ようと試みる手法である。

(4) 免疫アルゴリズム

免疫的アルゴリズムとは、遺伝的アルゴリズムと同様に進化論的計算手法の一つとして注目される最適化手法であり、多基準最適化問題などにおいて、複数の解集合の導出を試みる場合に問題となる解の硬直化を避けるために、生物の免疫機構を模した解空間の調整概念を導入することで多様な複数の解を得る手段として注目されている。

4.4 コンクリート・コンクリート構造物の最適化問題

最適化問題に対して適切な解を得るためには、下記の事項に関して問題を整理しなければならない。

- (1) 目的変数の設定
- (2) 説明変数および目的関数の設定

(3) 副次的変数の設定

(4) その他の条件の設定

ここでは、炭酸ガス排出量と改修コストに配慮して最適な補修工法を選定するという最適化問題（図-4.3）に対して問題を整理した例（表-4.1）を紹介する。

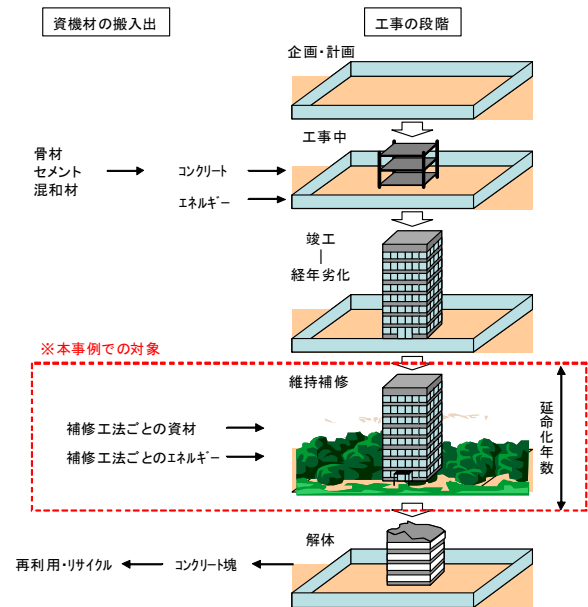


図-4.3 最適な補修工法選定問題の検討対象

表-4.1 補修工法選定事例における変数・関数の設定

項目	定義、摘要
問題	ある建物を補修する際に、延命化する年数あたりの炭酸ガス排出量と改修コストに配慮して補修工法を選定
目的変数	炭酸ガス発生量と改修コストに重み付けを与えた評価値 P $P = X \cdot Rx + Y \cdot Ry$
制約条件	なし
説明変数	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 延命化年数あたりの炭酸ガス排出量 X ✓ 延命化年数あたりの改修費用 Y ✓ 重み付け係数 Rx, Ry $X = (B+C) / A$ $Y = D / A$
制約条件	なし
副次的変数	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 補修工法ごとの期待される延命化年数 A ✓ 補修工法自身の材料製造・運搬に伴う炭酸ガス発生量 B ✓ 補修工事に伴う炭酸ガス発生量 C ✓ 補修工法ごとのコスト D $A = a_1, a_2, a_3, \dots$ $B = b_1, b_2, b_3, \dots$ $C = c_1, c_2, c_3, \dots$ $D = d_1, d_2, d_3, \dots$
制約条件	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 次回改修工事までの年数 A_{max} ✓ 当該改修工事条件で提示される最大炭酸ガス排出量 BC_{max} ✓ 当該改修工事条件で提示される最大コスト D_{max} $A \leq A_{max}$ $B+C \leq BC_{max}$ $D \leq D_{max}$
その他の設定条件	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 空間的バウンダリ 当該プロジェクトの敷地境界とし、必要な材料やエネルギーが搬入される ✓ 時間的バウンダリ 当該プロジェクトの補修工事開始から、期待耐用年数までの期間

5. 環境負荷のさらなる低減に向けて（施策 WG）

5.1 コンクリート構造物の環境側面を取り巻く状況

コンクリートやコンクリート構造物に関する環境側面について、国内外の状況などを整理した。例えば、日本建設業団体連合会では、建設工事（施工段階）における CO₂ 発生量を、施工高あたりの原単位（t-CO₂/億円）で 2010 年までに 12%削減（1990 年度比）することを目標としている。2006 年度において 18.9%の削減を達成しており、総排出量は 490 万 t-CO₂であった²⁾。また、セメント協会では 2010 年度におけるセメント製造用エネルギー原単位（セメント製造用+自家発電用+購入電力）を 1990 年度比で 3.8%低減することを目標としている。CO₂ 排出量の削減は目標としていないが 2006 年度において 20%削減（1990 年度比）している³⁾。

5.2 環境負荷低減方策の現状

(1) 環境負荷の発生の現状

100m³ の鉄筋コンクリート構造物の材料、輸送、製造・施工に関わるエネルギー消費量と CO₂ 発生量は、それぞれ 600GJ, 54t-CO₂であった⁴⁾。同様の構造物を鋼構造で建設する場合、およそ 80t の鋼材が必要であると仮定し、既往の原単位⁵⁾からエネルギー消費量と CO₂ 発生量は 1,483GJ, 99.7t-CO₂であった。鋼構造では材料の製造段階のみを対象とし、RC 構造物より有利な条件であったが、いずれも RC 構造は鋼構造の半分程度以下であった。

また、コンクリート、粗鋼、木材のマテリアルフローを比較すると、それぞれ 1t を生産するために 1.21t, 4.00t, 2.66t の原料、燃料を要した⁶⁾。

さらに、RC 構造の単位強度あたりの消費エネルギーを“1”として、他の構造材料と比較すると、鋼材：2.2、ガラス：4.2、レンガ：3.3、木材：0.32であった⁷⁾。

表-5.1 環境負荷に関する整理の項目

①コンクリート構造物に関する技術的な要素 設計、材料、施工、供用、維持管理、解体・廃棄を大分類として、関連する技術を要素毎に分類
②技術的な要素に関する一般的な特徴 物性、原材料、施工法などの特徴を分類した要素毎に整理
③一般に指摘される環境負荷または低減効果との関連 以下の環境影響との関連を整理 地球温暖化防止・オゾン層保護／大気・水・土壌・地盤環境の保全／省資源・循環型社会への貢献／有害化学物質対策／生物多様性の保全／機能保全・低下／統合的な貢献

このようにコンクリートあるいはコンクリート構造物は他の一般的な構造材料などと比較して環境負荷が小さい。さらに詳細に検討するため、ライフサイクルに沿って環境負荷の発生について整理した（表-5.1）。

(2) 環境負荷の低減方策

環境負荷の低減方策は以下のように大別できる。

- ・当該技術の負荷低減：従来と同等の材料、工法より小さな環境負荷を持つ材料や工法と置換する。
- ・便益による負荷低減：当該技術の適用による環境便益の増加が環境負荷の増加を上回る場合。例えば、高強度コンクリートの適用による材料使用量の削減、植生コンクリートの適用による水質浄化、道路網の整備による排気ガスの抑制などが挙げられる。
- ・代替方策による負荷低減：負荷の低減を他産業などに委ねる方法である。例えば、自然エネルギーを用いた電力の購入、植林など他領域での CO₂ 吸収、排出量取引など経済機構による他産業を利用した抑制策などである。今回の検討では対象としない。

コンクリートあるいはコンクリート構造物に関わる環境負荷低減技術を表-5.2 に示す内容で検討、整理した。

(3) ライフサイクルの各段階における低減方策と課題

a) 設計

工学的、経済的、社会的な長寿命化と部材レベルの再利用の効率向上を目指している。工業製品に比べて供用期間が長く、設計概念・情報の普遍性の確保が課題。また、高強度材料を効果的に採用し、ライフサイクルでの環境負荷の低減をすることが可能な場合もある⁸⁾。

b) 材料製造

セメント製造は国内 CO₂ 排出量の約 4%を占める。単位生産量当りの熱エネルギーは世界で最も小さく、ま

表-5.2 環境負荷に関する整理の項目

①環境負荷低減に向けた動き * 環境負荷低減技術の内容 対象とする環境要因／技術開発の方針／具体的な方策 * その低減技術に関連する動向 規格、規格関連／環境影響評価の方法／行政ほか施策の動向 * 得られた成果、期待される成果
②その低減技術に関する課題 技術的課題／行政的課題／開発者等が単独で対応すべき課題／業界や学会が対応すべき課題

た、廃棄物についてもセメント 1t 当り 400kg、年間 3,000 万 t が利用されている。さらなる効率の向上には、セメントの品質確保が最重要である。

高炉スラグやフライアッシュなどの混和は環境負荷を低減する。利用の増加には耐久性や解体後の再利用に関する情報を蓄積、公開することが重要である。

化学混和剤の適切な使用は単位セメント量を削減でき、環境負荷の低減に貢献する。一方で詳細なインベントリデータが公開されておらず、環境影響評価を適切に行うため公開が待たれる。

骨材は、鉄や貴金属材料のために鉱山資源を利用する場合と比べ負荷量が非常に小さい。しかし、使用量が膨大であるため、現在、枯渇する方向にある骨材資源の有効な利用法、特に低品質骨材の活用法を確立しなければ、大きな環境問題につながる可能性がある。

鉄筋は、ほとんどが電炉鋼を使用しており、転炉鋼（高炉鋼）を使用する鋼材に比べ環境負荷は小さく、例えば CO₂ 排出量は 60%程度である⁵⁾。現状では鉄筋を工学的かつ経済的に代替できる材料は見当たらず、当面はこのまま利用されるものと思われる。

c) コンクリート製造・運搬・施工

製造に関わる回収水とスラッジの利用について主に指摘した。規準・規格類が整備されても発注者の意識改革が伴わないと利用が進まないことが懸念された。また、今後、骨材の需給状況の変化などから運搬に関わる環境負荷の問題が顕在化するものと思われる。

施工においては周辺地域への環境保全、すなわち騒音、振動、排ガス、排水などについて法規制されている。これらの遵守は当然であるが、前項に示したように工事現場における省エネルギーなども進められている。

d) 供用

供用段階では空調や照明の省エネルギーによる環境負荷の低減が期待されている。コンクリートやその構造物についても長寿命化や省エネルギーに配慮した維持管理により負荷の低減に貢献できる。これには LCA ツールの準備が不可欠である。また、環境に対して直接機能するコンクリートも開発が進んでいる。例えば、水質浄化を目的にポーラスコンクリートを用いて護岸を建設することがある。これらの普及のためにはそれぞれの特性を活かした設計法が確立されなければならない。

e) 解体・再利用

解体作業については施工と同様に周辺環境への配慮が必要である。コンクリート塊についてはほぼ全量が再利用されているが、大部分は路盤材として利用されている。今後、社会資本整備の需要が停滞すれば、余

剰が生じる可能性がある。再生骨材としての活用が進められ、品質規格が制定されているが、品質に応じた用途を明確にしないと普及が進まない。

5.3 環境負荷を効果的に低減するために

コンクリートは他の構造材料などと比べて環境負荷は小さい。しかし、さらなる環境負荷の低減のためには技術的、施策的な検討が必要な技術もあった。

これまで示したように環境負荷の低減方策は、温暖化ガスとしての CO₂ の削減あるいは廃棄物の削減や再利用などに主眼を置くものが多数であった。例えば、日本経団連の環境自主行動計画では、対象とする温室効果ガスを CO₂ に限定している。環境負荷の低減のためには、表-5.1 に示すように他の要因についても考慮し、ライフサイクルを意識して環境影響について正しい認識を持つ必要がある。そのためにはインベントリデータや評価方法の整備が急務である。「3. コンクリート構造物の環境性能評価ツールの開発」で示したように種々の評価法が提案されているが、ISO/TC71/SC8

表-5.3 国内政策の手法と特徴¹⁰⁾

政策の種類	一般的な利点と欠点
広範な開発政策の中への気候政策の組み込み	容易に実施でき、障壁も克服できる。
規制と基準	排出削減を可能にする。生産者や消費者が価格変動に反応できない場合は他の手法よりも望ましい。
税金および課徴金	炭素価格を設定できるが、排出削減量を保証できない。税金はコストの内部化に効果的である。
排出権取引制度	炭素価格を確立。排出枠の量が効果を決定する。価格変動は合計コストの推計を困難にする。
資金インセンティブ	新技術の開発と普及の促進に多用される。コスト高だが障壁の克服に重要である。
自主協定	利害関係者間の意識向上により政策の進展に貢献できる。多くは大幅な削減効果を持たないが、最近では例外もある。
情報手法 (例：啓蒙活動)	行動変化への貢献により、環境の質の改善の可能性はあるが、排出量に与える影響は未評価である。
RD&D (研究、開発、実証)	技術前進の刺激、コスト低減、安定化に向けた進展を可能にする。

(コンクリート、鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリートに関する専門委員会/コンクリートおよびコンクリート構造物の環境マネジメントに関する分科委員会)で ISO 規格「Environmental Management for Concrete and Concrete Structures」の検討が始まっており標準化が待たれる⁹⁾。また、「4. 環境配慮における最適化」で示したように最適化についても検討が進んでいるが、数学的な最適解に加え、文化価値などにも配慮した社会的な意思決定や合意形成に有用なシステムへの発展が望まれる。

環境負荷の低減には、環境便益を得るための投資や便益と負荷の比較についても議論が必要である。現状の総合評価入札方式では、必ずしも環境負荷低減のための予算が十分に認められるわけではない。

環境負荷の低減のための施策的な手法は表-5.3のように、種々検討されている。環境税や排出量取引だけでなく、あるいは環境便益だけが強調されることなく、社会資本への投資について整備時の環境負荷も考慮し、持続的な発展が達成されるよう活発に議論が進められるべきである。

6. おわりに

現在世界で最も消費されている物質は水であるが、それに次いで消費量の多い物質がコンクリートである。現在、BRICs 諸国を中心に中進国・後発国において、かつてないスピードで建設活動が展開されており、コンクリート材料の採取に伴う自然破壊やセメント製造による CO₂ 排出量の急増が懸念されている。それに加えて将来的には、現在日本が経験しつつあるコンクリート構造物の大解体時代を迎えるであろうことは容易に予想される。現在日本で生じているコンクリート構造物の建設活動および解体活動に伴う CO₂ 排出量および廃棄物量の増大問題は、近い将来、中進国・後発国において想像を遙かに上回る規模で生じるであろう。このようなコンクリートに関わる環境問題の解決に資することを目的として、2008年3月、ISO/TC71/SC8 が設置され、日本は幹事国（議長および幹事）としてコンクリート構造物の設計やコンクリートの製造・施工に関する環境側面の国際標準制定を主導的に進める役割を担うこととなった。日本コンクリート工学協会は、その推進の中心的役割を担わなければならない団体であり、今後、コンクリートの生産活動やコンクリート構造物の建設活動によって生じる環境負荷低減に向けて、よりいっそう積極的に研究活動・社会活動に取り組んでいく必要がある。

参考文献

- 1) 野口貴文：現実社会における長期的・広域的な環境性能評価，コンクリート工学，Vol.45，No.5，pp.39-44，2007.5
- 2) 日本建設業団体連合会：<http://www.nikkenren.com/ondanka/co2/index.html>，2008.4
- 3) セメント協会：セメント産業における地球温暖化対策の取り組み，http://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/jg1h_01.pdf，2007.10
- 4) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），コンクリートライブラリー125，土木学会，2005.11
- 5) 土木学会コンクリート委員会・コンクリートの環境負荷評価研究小委員会：コンクリートの環境負荷評価（その2），土木学会コンクリート技術シリーズ No.62，p.39，2004
- 6) 谷川寛樹・井村秀文：都市建設にともなう総物質必要量の定量化と評価に関する研究－住宅地整備のケーススタディー，土木学会論文集，No.671/VII-18，pp.35-48，2001.2
- 7) P. C. Kreijger：Ecological properties of building materials, Materials and Structures, vol.28, pp.248-254, 1987
- 8) 大脇英司ほか：建設工事における LCA と環境保全・改善への取り組み，コンクリート工学，Vol.45，No.5，pp.109-113，2007.5
- 9) ISO/TC71 対応国内委員会：ISO/TC71 第 14 回総会報告，コンクリート工学，Vol.45，No.10，pp.71-79，2007.10
- 10) 環境省：IPCC 第 4 次評価報告書，第 3 作業部会報告書，概要（公式版），p.47，2007.5.22