

論文 コンクリート構造物の環境設計に関する基礎的研究

堺 孝司^{*1}・草薙 悟志^{*2}

要旨：現在，資源の枯渇，温暖化，及び各種環境劣化などの地球環境問題は，その深刻さを増している。膨大な資源・エネルギーを利用する建設分野の環境負荷は少なくないが，現行の構造物設計技術体系は安全性が中心となっている。従って，今後は，環境側面を示方書や基準に組み込むことが極めて重要となる。本論文では，コンクリート構造物の環境設計体系を提案すると共に，ライフサイクル環境負荷評価システムを構築した。また，これに基づいて実構造物の新設及び解体・リサイクルに関する環境負荷データを分析し，土木コンクリート構造物の場合，材料製造に関わる環境負荷の割合が大きいことなどを示した。

キーワード：環境設計，環境負荷，エネルギー，CO₂，ライフサイクル

1. まえがき

資源の枯渇，温暖化，及び各種環境劣化などの地球環境問題は，開発途上国の急激な発展と共に，その深刻の度合いを増してきている。日本も，京都議定書に基づき，あらゆる分野において地球温暖化ガスの削減に向けた施策を進めている。日本における CO₂ 発生量のおよそ 1/3 が直接間接に建設分野に起因しているとされている¹⁾。従来の構造物設計技術体系は，安全性を軸として形成されており，最近漸く環境問題に直結する耐久性や維持管理が組み込まれ始めたものの，具体的な方法論については緒に就いたばかりである。地球温暖化ガスに関する設計上の配慮を示方書や基準等で明確にしているものはほとんどないといっても過言ではない。実態がどうなっているかについてのデータも極めて少ない。このような状況を考慮すると，今後現行の設計体系に環境側面を組み込んだ，いわゆる環境設計体系を構築することが極めて重要となる。また，コンクリート構造物の建設や，運用，維持管理，及び解体等における環境負荷に関するデータの蓄積と，それらの情報の環境設計へのフィードバックが必要となる。

本論文では，コンクリート構造物の環境設計体系を提案するとともに，ライフサイクル環境負荷評価システムを構築し，これに基づいて実構造物の新設及び解体・リサイクルに関する環境負荷データを分析し，考察を行った。

なお，本論文で用いる用語「環境設計」は，技術用語として一般的ではないが，ここでは環境側面を構造物の設計に組み込むという新しい概念を表記するために用いることにした。

2. コンクリート構造物の環境設計体系

図-1に，提案するコンクリート構造物の環境設計体系を示す。この設計体系の特徴は，従来の安全性や使用性あるいは耐久性などの照査に，「環境性」の照査を組み込んだ性能照査型設計法にある。性能設計は，「要求性能」の設定と，「性能照査」からなる。性能照査は，材料，施工などに関する一定の前提条件の下で行われるのであるから，その前提条件が実際に確保されているかどうかを確認するための「検査」が必要となる。また，構造物の実際の挙動に関する時間の関数としてのデータが少ないことを考慮すれば，供用中の「モニタリング」情報が有効

*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 株式会社四電技術コンサルタント

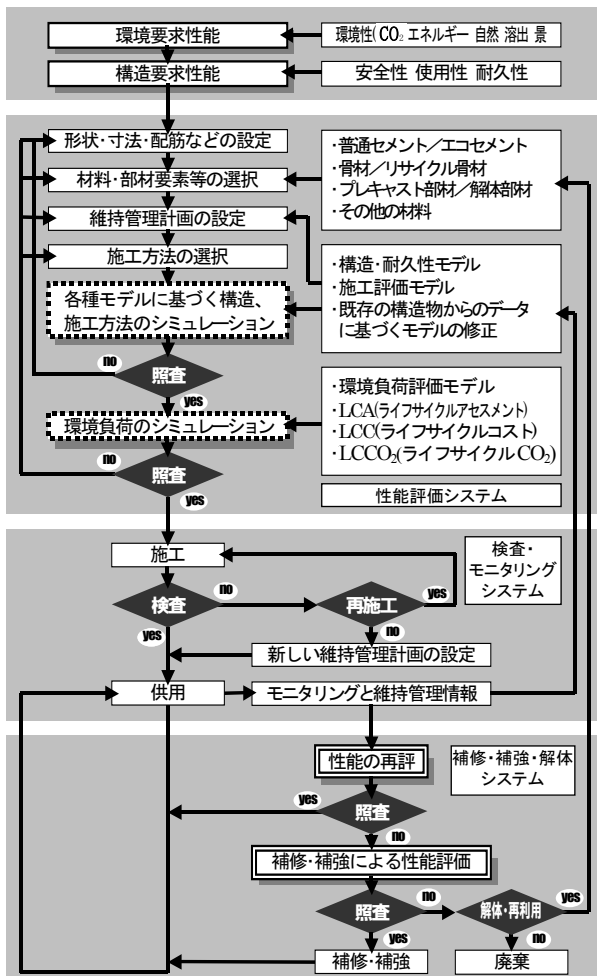


図-1 コンクリート構造物の環境設計

に利用されるシステムも必要となる。

一般に、建設プロジェクトが計画されると、計画者は種々のフェジビリティスタディを行い構造物の種類を選択することになる。その際、従来の構造的な性能に加えて、環境性能も考慮する必要がある。環境性能については、まだ評価の定まった指標は確立されていないが、CO₂、エネルギーなどに加えて、土地利用による自然改変、有害物質の排出、景観などが考えられる。問題は、本質的に意味の異なるこれらの指標をどう総合的に評価するかであり、最終的には何らかの「統合環境指標」の導入が必要となるが、環境性能の設定にはいろいろな可能性がある。何らかの根拠に基づいて環境要求性能として絶対値を与える場合、あるいは標準からの相対的な値を与える場合が考えられる。前者では、社会的あるいは政治的な背景により決められる要求

が考えられる。後者では、例えば標準構造との比較によりポイントをつける方法である。構造物の寿命は、耐久性に対する要求性能の設定によって決まるが、当然のことながら長期的性能を評価する技術が必要となる。耐久性確保による構造物の長寿命化の本質は、経済性と環境負荷低減の最適化にある。

さて、要求性能が設定されると、先ず構造物の形状、寸法、配筋などを決定する。次に、材料や部材要素を選択する。材料選択には、エネルギーや資源利用などによる環境負荷の観点も考慮される。これらとの関連で維持管理計画も設定する。次に施工法の選択をする。当然、施工における環境側面も考慮される。これらの前提条件の下で、各種モデルに基づく構造・施工シミュレーションを行う。これらの結果が要求性能を満足すれば、次に環境負荷シミュレーションを行う。環境負荷シミュレーションでは、建設時の直接的な環境負荷に加えて、ライフサイクルでの環境負荷も考慮しなければならない。環境性能の照査に関する具体的な方法については、今後の大きな課題であり、環境負荷低減を誘導するメカニズムを考慮した手法の開発が必要である。これらの照査が終了すれば、実際の施工、検査、供用、維持管理に伴う性能再評価、補修、解体・再利用、廃棄等のライフサイクルとなる。

これら全体の流れの中で特に重要なことは、モニタリングや維持管理情報がシミュレーション用各種モデル体系にフィードバックされるシステムを構築しておくことである。これまでこのようなシステムが考慮されてこなかったことが、構造物の耐久性の評価、ひいては寿命評価を困難なものにしてきた。

コンクリート構造物に関する現行の設計法は、長い間蓄積されてきた技術情報に基づいて形作られてきたが、構造物の長寿命化や資源効率の本質的な意味である環境の視点が極めて希薄であったと言わざるを得ない。建設産業が大量の資材を使用する資源依存型の産業であるこ

とを考慮すると、環境設計体系の構築と具体的設計技術の開発が喫緊の課題であるが、ここで提案する環境設計体系は、個別の技術課題の全体での位置づけを明確にする。以下に、コンクリート構造物の環境負荷評価システムと、実構造物の新設・解体・リサイクルに必要なエネルギー消費量及びCO₂排出量に関して検討する。

3. コンクリート構造物の環境負荷評価

3.1 ライフサイクル環境負荷評価システム

図-2に、コンクリート構造物のライフサイクル環境負荷評価システムを示す。これらは、構造物の建設、供用、解体、廃棄・リサイクルからなり、全ての段階で必要な負荷量の算定をすることとなる。建設段階においては、各種基礎材料の製造、それらの輸送、コンクリートの製造と輸送並びに打設と養生におけるエネルギー使用及びCO₂排出等の評価が必要となる。材料として副産物等を利用する場合には、それらの

環境負荷低減効果を評価すべきであるが、現状では技術的に難しい。客観的な評価基準の構築が望まれる。次に供用中の補修あるいは補強に関わる環境負荷が評価される。建物の場合には、設備や運用に関わる環境負荷も評価の対象となる。構造物が寿命となれば、あるいは更新する場合、これらを解体する必要がある。解体に必要なエネルギーやCO₂排出等が環境負荷評価の対象となる。最後に、発生した解体材のリサイクル処理や廃棄に関わる環境負荷評価を行わなければならないが、何れも評価方法に検討すべき課題が残されている。

環境負荷評価にはライフサイクルでのインベントリ分析が必要となるが、インベントリ分析には積み上げ法と産業連関分析法がある。前者は、用いる材料の製造、運搬、工事、廃棄・リサイクルなどについてエネルギー消費量や二酸化炭素排出量などの環境負荷データを具体的に調べて積み上げる方法であり、インベントリ分析の根拠が明確となるが、調査に多くの手間がかかる。一方、産業連関分析法は、日本で1年間に生産、消費する全ての財・サービスの取引量を部門毎に貨幣単位で表した産業連関表により、産業間にわたる既知のインベントリを利用して直接間接環境負荷データを求める方法であるが、あくまで部門の平均的な評価であることや貨幣単位で処理されることからかなり大雑把なものとなることは否めない。

本研究で対象とする環境負荷データは、エネルギー消費量(GJ)と二酸化炭素(t=10³kg)の2種類とし、環境負荷原単位は、積み上げ法による文献²⁾を基本とした。工所用機械の機械出力、運転1時間当たり燃料消費率、運転1時間あたり損料率については、文献³⁾に示されている値を用いた。また、材料の製造についての原単位は、文献⁴⁾の値を用いた。

3.2 実構造物の環境負荷評価実施例

(1) コンクリート橋の新設

本工事の概要は、橋長 271.27m、支間長 31.475m+4@34.95m+3@30.26m、幅員は車道

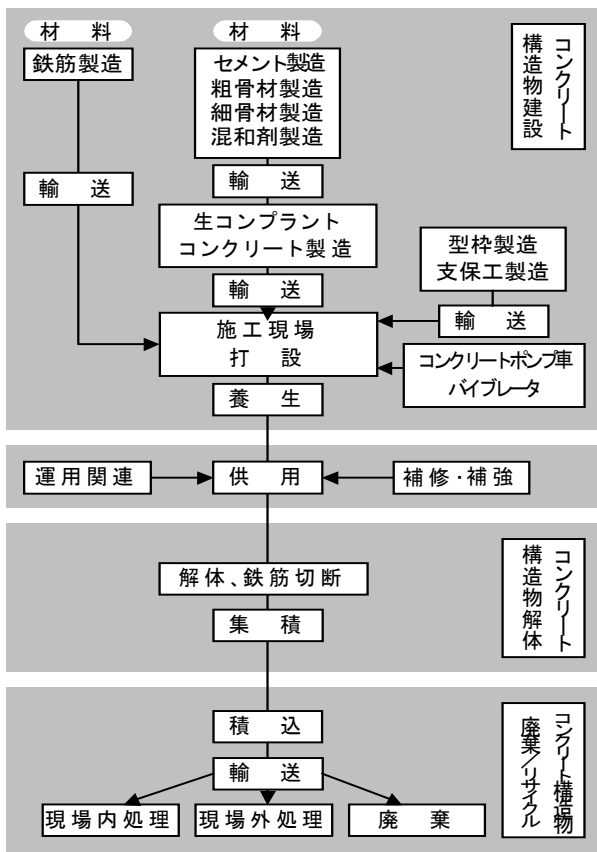


図-2 コンクリート構造物のライフサイクル環境負荷評価システム

8.00m, 歩道 2.5m であり, 基礎形式は直接基礎 (橋台 2 基, 橋脚 7 基), また上部工形式は PC 単純ポストテンション T 桁橋及び PC 連結ポストテンション T 桁橋である。また, 主な材料の数量は以下の通りである。

コンクリート : 6,318m³ (上部工 4,391m³, 下部工 1927m³)
 鉄筋 : 693t (上部工 459t, 下部工 234t)
 PC 鋼材 : 90.2t

図-3, 図-4 及び図-5, 図-6 に下部工及び上部工に関する材料製造時のエネルギー消費量と CO₂ 排出量を示す。下部工の CO₂ 排出量は, コンクリート材料が約 60%, 鉄筋が約 35% であり, エネルギー消費については鉄筋が約 60%, コンクリート材料が約 35% であった。上部工の CO₂ 排出量は, コンクリート材料が約 50%, 鉄筋及び PC 鋼材がそれぞれ約 20% であった。エネルギー消費量については, コンクリート, 鉄筋, PC 鋼材がそれぞれ約 30% であった。材料製造時の総 CO₂ 排出量は約 2945t であり, 材料輸送と施工における CO₂ 排出量はそれぞれその約 5% 及び 15% であった。このように, 材料輸送に関する環境負荷は少なく, 施工に関するものが比較的大きな値となったが, 材料製造時の CO₂ 排出量が全体の約 83% を占める。また, エネルギーに関しても, 総使用量 36,181GJ のうち, 材料製造時のものが約 80% を占める。

(2) 河川樋門改築

本工事の概要は, 120m にわたる堤防改築 (引堤) と樋門改築 (撤去と新設) であり, 主な材料の数量は以下の通りである。

撤 去 : コンクリート 95m³,
 アスファルト版 926m²
 リサイクル : コンクリート 230t,
 アスファルト 109t

新 設 : コンクリート 337m³, 鉄筋 12t

図-7 及び図-8 に材料製造時のエネルギー消費量と CO₂ 排出量を示す。エネルギー消費量については, FRPM 管, コンクリート, 型枠, 車歩道境界ブロック, 鉄筋・鋼矢板がほぼ同じ

割合である。また, CO₂ 排出量についてはセメントと FRPM 管製造が大きな割合を占めている。なお, セメントの約 4 割に高炉セメントが用いられている。また, FRPM 管は, 積み上げによる原単位が取得できなかったため, 文献⁴⁾の強化プラスチック製品により算定した。材料製造時のエネルギー消費量は約 2261GJ であり, 材料輸送と施工におけるエネルギー消費量はそれぞれその約 4% 及び 31% である。また, 材料製造時の CO₂ 排出量は約 184t であり, 材料輸送と施工における CO₂ 排出量はそれぞれその約 3% 及び 32% であった。このように, この工事においても, 材料輸送に関する環境負荷は小さく, 土工等の各種工事に必要な建設機械の稼働による負荷量が比較的大きくなることが明らかになった。したがって, 施工重機が多く用いられる工種では, 環境負荷低減上エネルギー効率のよい重機の使用が重要となる。

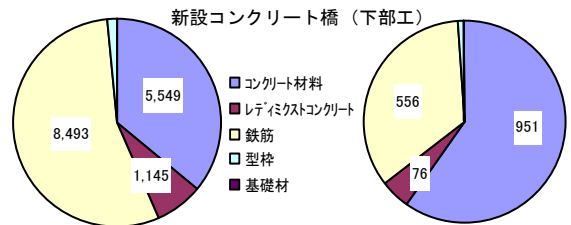


図-3 材料製造時エネルギー消費量 (GJ)

図-4 材料製造時 CO₂ 排出量 (t)

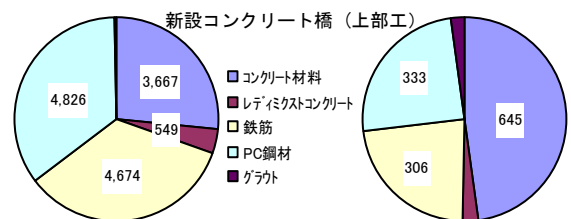


図-5 材料製造時エネルギー消費量 (GJ)

図-6 材料製造時 CO₂ 排出量 (t)

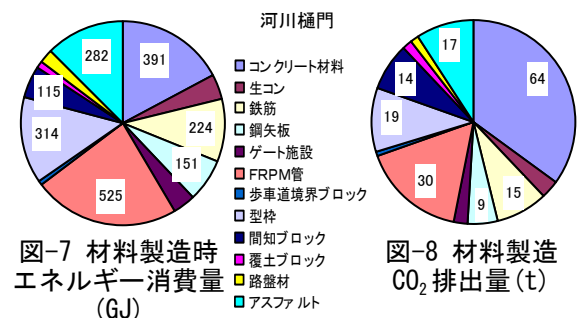


図-7 材料製造時エネルギー消費量 (GJ)

図-8 材料製造時 CO₂ 排出量 (t)

解体は、コンクリート樋門、アスファルト版、及び石積みについて行われた。エネルギー消費量とCO₂排出量とも、樋門解体が全体の約70%となったが、その絶対量はそれぞれ約54GJ及び3.6tであった。コンクリートのリサイクルは、現場外での普通処理で算定し、それぞれ約15GJ及び0.6tと、他と比べてかなり小さな値となった。これを加熱すりもみの高度処理をすると、それぞれ約10倍及び14倍の負荷量となる。図-9及び図-10に、本改築工事におけるエネルギー消費量とCO₂排出量の、材料製造、材料輸送、施工、解体、リサイクル毎の割合を示す。図から分かるように、本工事では、材料製造による環境負荷が全体の約73%を占める結果となった。

(3) 既設コンクリート橋の解体撤去

本工事の概要は、橋長90m、支間長8@11.25m、幅員が車道9.00m、歩道2@2.5mであり、基礎形式は杭基礎（橋台2基、橋脚7基）、上部工形式は鉄筋コンクリート連続桁橋である。また、主な材料の数量は以下の通りである。

解体撤去：コンクリート 1,080m³、アスファルト版 1,504m²、鋼材 29.5t

リサイクル：コンクリート 2,700t、アスファルト 449t

コンクリート橋解体には、コンクリートの破碎、小割、鉄筋切断、アスファルト舗装版切断、ガードフェンス撤去が必要であるが、図-11及び図-12に示すように、エネルギー消費量と二酸化炭素排出量の約80%がコンクリートの破碎及び小割によるものであった。解体によるエネルギー消費量とCO₂排出量は、それぞれ約1053GJ及び71tである。なお、コンクリート解体における使用機械、使用時間、燃料使用量に関しては現場の資料及びヒアリングによる情報を取得し原単位を算出した。表-1及び表-2に、それぞれコンクリートの破碎工及び小割の原単位を示す。破碎に用いた機械は標準より大きく、結果として建築構造物からのデータに基づく文献2)と比べて環境負荷原単位は大きなも

のとなった。このように、対象とする構造物によって、機械の規模が異なり、これらが環境負荷量に直接影響することがわかる。

現場からの撤去のための積み込みに関するエネルギー消費量及び二酸化炭素排出量はそれぞれ約145GJ及び9.7tである。また、運搬に関わるものはそれぞれ約58GJ及び4tとなり、全体としては小さい。

コンクリートのリサイクル処理については、現場外普通処理施設における2種類のジョークラッシャー、篩い、場内輸送、重機に関するヒアリング資料から原単位を算定した。表-3にクラッシャー等原単位及び重機等原単位の算定結果を示す。これらに基づく本橋解体コンクリートのリサイクルによるエネルギー消費量及びCO₂排出量はそれぞれ、約642GJ及び35tとなった。

図-13及び図-14は、本橋の解体からリサイクルまでのエネルギー消費量とCO₂排出量を示す。このように、解体からリサイクルまでの環境負荷量は普通処理では比較的小さく、エ

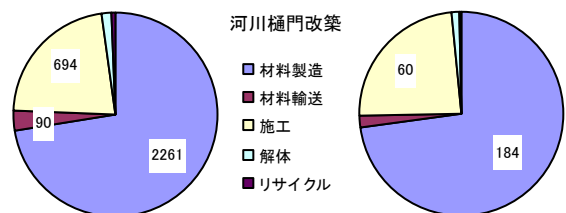


図-9 エネルギー消費量 (GJ)

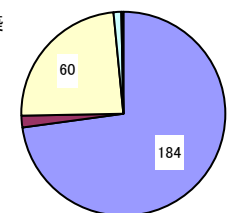


図-10 CO₂ 排出量 (t)

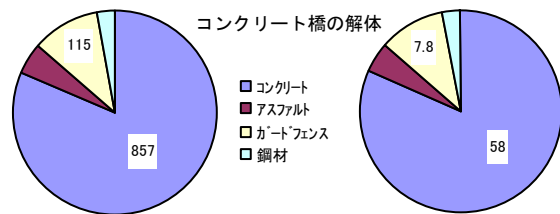


図-11 エネルギー消費量 (GJ)

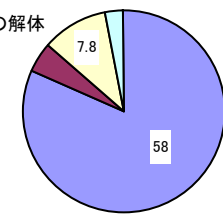


図-12 CO₂ 排出量 (t)

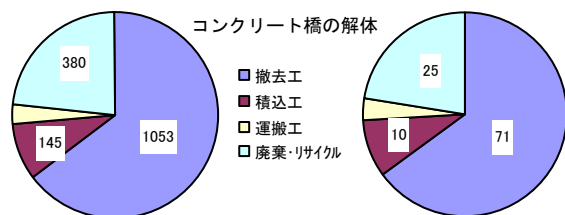


図-13 エネルギー消費量 (GJ)

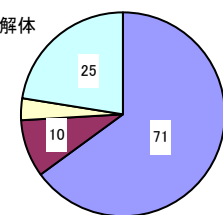


図-14 CO₂ 排出量 (t)

表-1 コンクリート破砕工原単位

使用機械	軽油投入量	エネルギー消費量原単位	CO ₂ 排出量原単位
	l/m ³	MJ/m ³	kg-CO ₂ /m ³
バックホー 1.5m ³ 級+油圧 破砕機(170t)	15.08	628.2 (233.3)*	42.57 (15.8)*

*文献 [2]

表-2 コンクリート子割り原単位

使用機械	軽油投入量	エネルギー消費量原単位	CO ₂ 排出量原単位
	l/m ³	MJ/m ³	kg-CO ₂ /m ³
バックホー 0.6m ³ 級+油圧 破砕機(56~ 100t)	8.62	359.1	24.33

表-3 コンクリートリサイクル処理関連原単位

使用機械	エネルギー種	エネルギー消費量原単位	CO ₂ 排出量原単位
		MJ/t	kg-CO ₂ /t
ジュークラッシャーA	電力	37.64	1.484
ジュークラッシャーB		27.60	1.088
篩い		14.75	0.582
系内輸送		15.11	0.596
バックホー0.6m ³ +油圧破砕機 (100t)	軽油	55.55	3.76
バックホー0.6m ³		53.18	3.60

エネルギー消費量と CO₂ 排出量は、コンクリート単位量当たりでそれぞれ、上述した新設橋の場合の約 26%及び 17%に相当する。当然、用いる機械の性能やリサイクルシステムの相違によりこれらの値は大きく変化する。

4. 結論

本研究の範囲で以下のことが言える。

(1) コンクリート構造物の安全性と環境性を性能照査型設計法の体系で扱うことは可能である。ただし、環境性能の照査システムについては、環境負荷低減を誘導するメカニズムを考慮した手法の開発が必要である。

(2) 土木コンクリート構造物の場合、エネルギ

ー消費量と CO₂ 排出量は、主要材料であるコンクリートや鉄筋の製造に関わるものが大きな割合となるが、構造物の種類や工種によっては施工重機の影響が比較的大きくなる場合がある。

(3) コンクリート構造物の解体・リサイクルに発生するエネルギー消費と CO₂ 発生量は、本研究で取り上げた事例では、コンクリート単位量当たりでそれぞれ新設の場合の約 26%及び 17%に相当した。

(4) コンクリートの破砕やリサイクル処理に関する原単位は、構造物の種類や用いる機械・システムにより大きく異なる。

(5) 土木コンクリート構造物の場合、材料製造に関わる環境負荷の割合が高いため、耐久構造物の建設、つまり耐久設計の高度化及び適切な方法による既存構造物の長寿命化が、環境負荷低減に最も寄与すると思われる。

なお、本論文で提案した「環境設計」の枠組の有用性については、今後具体的な設計の実施により検証する必要がある。

謝辞

本研究の実施に当たり、国土交通省四国整備局、香川県、及び株式会社四電技術コンサルタントの西谷淳、入谷祥王、見村吉昭の各氏の協力を得た。また、(社)四国建設弘済会による建設事業の技術開発に関する助成を受けた。ここに記して、深甚の謝意を表する。

参考文献

1. 鹿島建設：鹿島環境報告書，2003年版
2. 土木学会：コンクリートの環境負荷評価，コンクリート技術シリーズ 44，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，2002
3. 日本建設機械化協会：建設機械等損料算定表，平成 14 年度版
4. 日本建築学会：建物の LCA 指針（案）—地球温暖化防止のための LCCO₂ を中心として，1999