

論文 超高強度繊維補強コンクリートの適用による環境負荷低減効果

石原 明日子^{*1}・大脇 英司^{*2}・新藤 竹文^{*3}・堺 孝司^{*4}

要旨：超高強度繊維補強コンクリート（UFC）は強度特性や耐久性能が優れ、構造や施工方法の合理化が可能であることから、環境負荷の低減についても期待される。UFCを使用した単径間 PC 箱桁橋（UFC 橋）について CO₂, SO_x, NO_x, ばいじんの排出量を算出し、従来形式の 3 径間 PC 単純床版橋と比較した。UFC 橋は上部工の軽量化により下部工や仮設工の合理化が進み、CO₂, NO_x の排出量が削減できた。一方蒸気養生等に起因する SO_x, ばいじんの排出量は増加した。これらの結果から、地球温暖化、酸性化への影響の評価指標および環境影響を総合的に評価する指標が、UFC の適用により 10~30%低減できることを示した。

キーワード：環境影響, 超高強度繊維補強コンクリート, CO₂, SO_x, NO_x, ばいじん

1. はじめに

地球規模や地域の環境に関する課題は建設産業においても解決すべき課題である。国際的にはいわゆる京都議定書が 2005 年 2 月に発効し、我が国も 2008 年から 2012 年までの間に温暖化ガスの排出量を、1990 年を基準として 6%削減することが法的拘束力を持つ課題となった。

建設産業では社会からの要請を受け、リサイクルの推進、構造物の耐久性の向上、副産物の利用等の取組みがなされ、これらを推進するための指針等が制定されてきた。国土交通省は従来の工事コストのほかに、環境の改善、リサイクルの推進等を社会的コストとする新たな概念を提示し、発注時に環境負荷の低減を図るための施策を進めている¹⁾。日本建設業団体連合会からも、リサイクルや環境経営の推進等自主的な活動を進めている²⁾。環境影響に対する評価手法についても検討が進んでおり、土木学会ではコンクリート構造物の環境影響をライフサイクルアセスメント（LCA）の手法を用いて評価する手法や^{3),4)}、コンクリート構造物の環境性能を照査するための指針（試案）⁵⁾を示した。

国内における、狭義の建設産業の CO₂ 排出量、すなわち施工時における排出量は全産業の排出量のうち約 1%を占めるに過ぎない⁶⁾。一方、建設材料の製造や構造物の供用時のエネルギーに由来する CO₂ 排出量は、全産業の総排出量の約 30%を占める⁶⁾。効果的に環境負荷を低減するためには、構造物の設計時に構造物のライフサイクルを踏まえて使用材料や供用時のエネルギーを考慮することが必要である。使用材料の面からは、資材量の削減や副産物の使用などが環境負荷低減に有効であると考えられる。

本論文では、資材量の削減による環境負荷低減を目的とし、圧縮強度 200N/m² 級の強度特性と優れた耐久性を持つ超高強度繊維補強コンクリート（UFC）⁷⁾を取り上げた。UFC の使用により、構造形式や経済性について合理化を進めた構造物では環境影響の低減についても期待される。既往の報告では UFC を適用した酒田みらい橋の CO₂ 排出量を求め、環境負荷が低減されていることを示した^{8),9)}。本論文では CO₂ 排出量に加えて SO_x, NO_x, ばいじんの排出量を求め、UFC の環境負荷低減効果を検証した。

*1 大成建設（株） 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室研究員 工修（正会員）

*2 大成建設（株） 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室主任研究員 工博（正会員）

*3 大成建設（株） 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室主席研究員 工博（正会員）

*4 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. 酒田みらい橋について

UFC を用いた国内初の橋梁である酒田みらい橋 (UFC 橋) を評価対象とした (写真-1, 図-1, 表-1)。橋長 50m であるが, 上部工に UFC を採用し, 単径間とすることが可能になった。UFC は強度特性や耐久性能に優れることのほかに, 配合上の特徴として単位セメント量が大きく, 鋼繊維を含むことが挙げられる (表-2)。比較のため, 在来工法による 3 径間 PC 単純床版

橋 (PC 橋) を想定した (表-1, 図-2)。酒田みらい橋の架設に際して撤去した前田橋 (昭和 31 年建設) は 4 径間であったが, 3 径間とすることでより合理的に建設できること, 酒田みらい橋の上流側の橋梁が 3 径間であることを参考にした。



写真-1 酒田みらい橋 (UFC 橋)

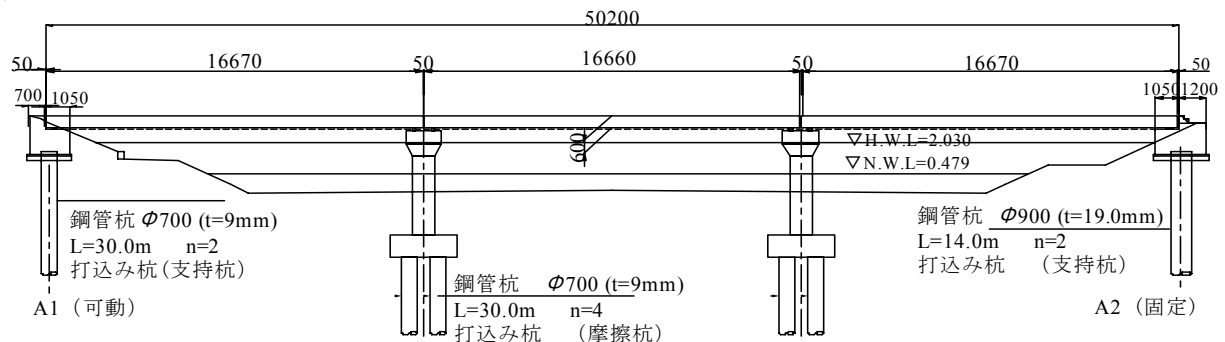
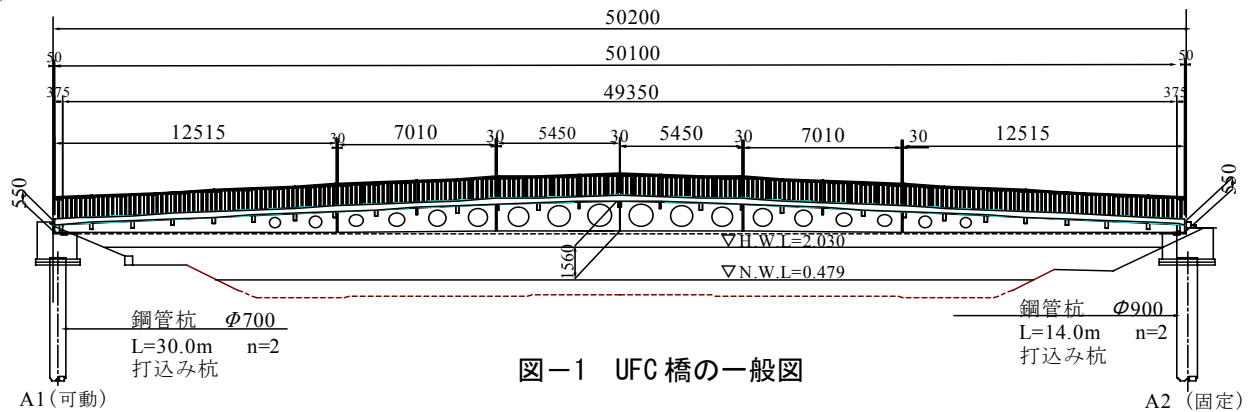
表-1 構造物の概要

	UFC 橋 ¹⁰⁾	PC 橋
構造形式	単径間 PC 箱桁橋 全外ケーブル方式	3 径間 PC 単純床版橋 プレテンション方式
橋長	50.2m	
幅員	2.4m (全幅), 1.6m (有効幅員)	
支間長	49.35m	16.7m
桁高	0.55m (端部) 1.56m (支間中央)	0.6m
架設工法	プレキャストブロック架設工法	
下部構造	鋼管杭基礎	

表-2 UFC の配合¹¹⁾ (単位: kg/m³)

水 ^{注1)}	セメント	けい石微粉末 シリカ他	鋼繊維	高性能 減水剤
180	818	1479	157	24

注 1 ; 高性能減水剤の水量 19kg/m³ を含む



3. 環境負荷量の算出方法

環境影響が地球規模または広域におよぶ地球温暖化、酸性化について着目した。温暖化ガスとして CO₂、メタン等が指摘できるが、インベントリデータが整備されている CO₂ 排出量を算出の対象とした。また酸性化の原因物質として NO_x、SO_x を取り上げ、その排出量を求めた。またこれらと同時に発生することの多いばいじんについてもその排出量を算出した。インベントリデータは既往の報告から引用し^{4)・12)}、各排出量を環境負荷量として積み上げ法により求めた。UFC 橋のライフサイクルを対象に評価するが、ここでは“材料の製造”から“竣工”までを対象とした。対象外とした“供用期間”(数十年～百年程度を想定)の維持管理に関わる負荷については UFC 橋は耐久性が高いため維持管理の必要性が少ないと考えられる。一方 PC 橋の供用期間は考慮すべきであるが、ここでは単純に比較のため維持管理は行わないと仮定した。なおこれにより UFC 橋の評価が有利になることはない。

さらに両橋の機能が同一で環境便益も等しいと仮定すると相違が認められないことから“供用”段階について省略した。また、UFC の解体・再利用の過程が明確でないことから、解体・廃棄段階についても対象から除外した。

施工手順と評価の範囲(点線枠)を図-3に示した。実際には既設の前田橋の橋脚を利用して UFC 橋を架設後、橋脚を撤去したが、PC 橋との比較のため UFC 橋についても橋脚の撤去後に架設するものとした。

各々の排出量は材料の製造、桁の製造、輸送、現地施工に分け、上部工、下部工、仮設工について算出した。“材料の製造”には材料や資材の原料の採取から製品製造に至る排出量を含む。主な材料の使用量を表-3に示す。“桁の製造”には主桁の製造時の排出量を含み、型枠の加工に関する排出量も含む。UFC 橋の桁は特殊な形状であるため新規に鋼製型枠を作製し、修整を加えて複数回使用し、他の構造物の型枠への転用や鋼材の再利用は行わないと仮定した。PC 橋

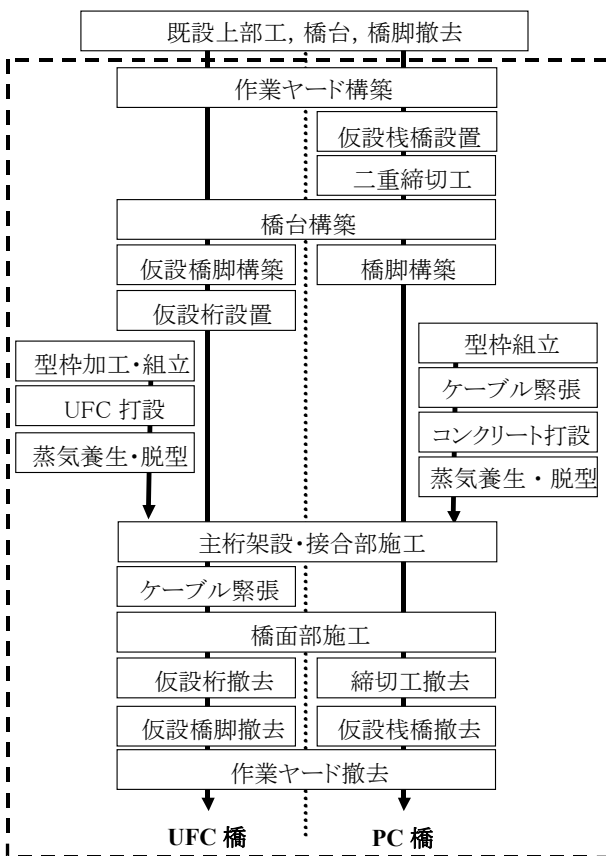


図-3 施工手順および評価の対象範囲

表-3 材料の使用量

	UFC 橋		PC 橋	
	上部工	下部工	上部工	下部工
UFC	21m ³	—	—	—
鉄筋コンクリート	—	24m ³	51m ³	45m ³
PC 鋼線	3.5t	—	2.8t	—

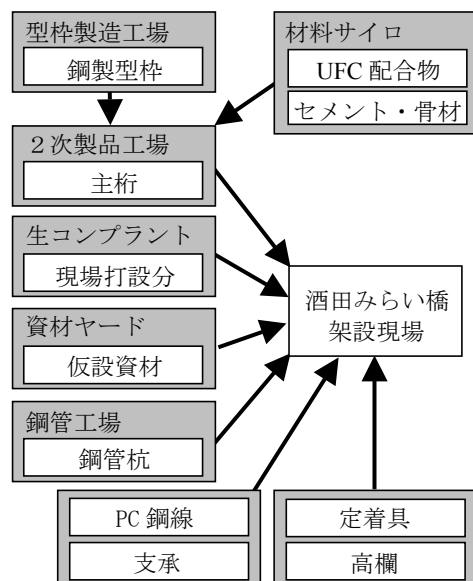


図-4 材料や資材の輸送

の桁には標準的な鋼製型枠を使用し、一般的な転用回数として300回の転用を想定した。“輸送”では材料や資材の輸送に関わる排出量を算出した(図-4)。“現地施工”は建設機械の使用など、架設現場での施工に関わる排出量を算出した。

4. 環境負荷量の算出結果

4.1 CO₂ 排出量の算出結果

UFC 橋と PC 橋の CO₂ 排出量はそれぞれ 135t と 185t であり、UFC の適用により 27%削減していた(図-5)。UFC 橋では橋脚の省略により下部工と仮設工において排出量の削減が見込まれた。PC 橋の下部工の CO₂ 排出は主に鋼管杭の材料製造に由来し、仮設工での排出は仮設栈橋、二重締切工に使用する材料に由来していた。橋脚のない UFC 橋ではこれらの排出量は少なく、PC 橋と比べて下部工で 67%、仮設工で 76%の削減となった。

上部工ではPC 橋と比較してCO₂ 排出量が増加した。上部工の排出量の内訳(図-6)から、“桁の製造”での増加が顕著であった。31tの排出量の97%は蒸気養生時の重油の燃焼によって生じ、UFC 橋全体のCO₂ 排出量の22%を占めた。また、“材料の製造”における増加は、新規に鋼製型枠を作製し、UFC 橋架設後の再利用を考慮していないためであった。主要な材料であるコンクリート(UFC)の使用量はPC 橋の半分以下であったが(表-3)、単位セメント量は、PC 橋の上部工での単位セメント量を400kg/m³とするとおおよそ2倍であり(表-2)、コンクリート量の削減による効果は相殺されていた。

4.2 NO_x 排出量の算出結果

UFC 橋と PC 橋の NO_x 排出量はそれぞれ 248kg と 438kg であり(図-5)、UFC の適用により 43%削減していた。CO₂ 排出量の場合と同様に上部工では排出量が増加したが、下部工と仮設工でそれぞれ 75%と 73%の削減が見込まれた。上部工での NO_x 排出量の増加は CO₂ 排出量の場合と同様に、鋼製型枠の再利用を考慮しないことや蒸気養生に使用する燃料の影響による。また、NO_x

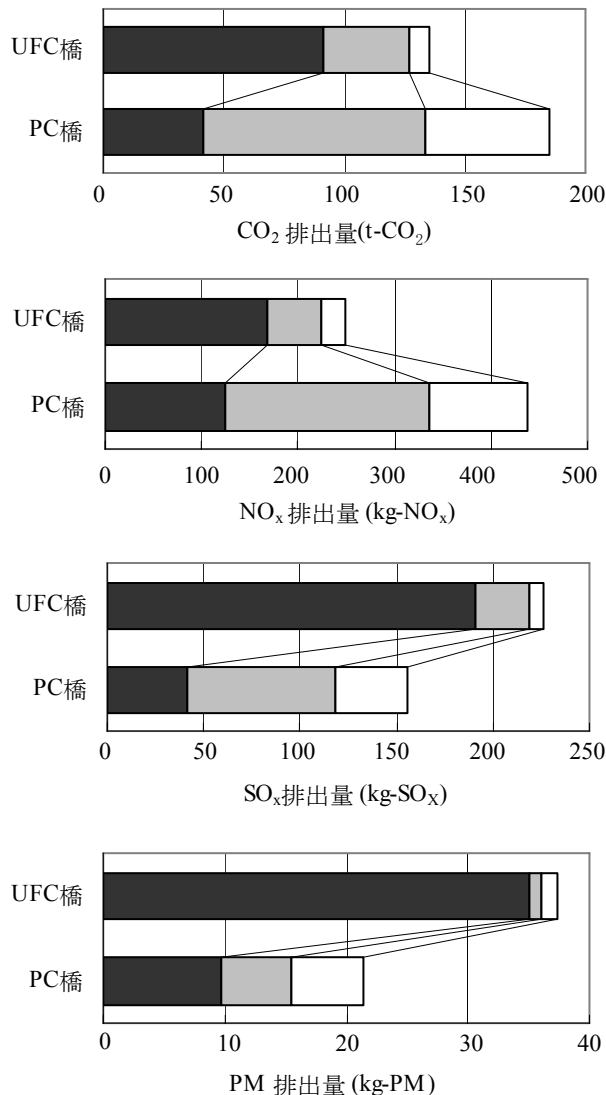


図-5 UFC 橋および PC 橋の CO₂, NO_x, SO_x, ばいじん (PM) 排出量

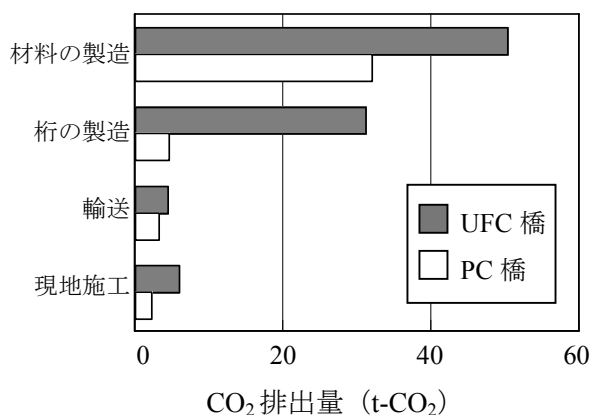


図-6 上部工の CO₂ 排出量の内訳

量が NO_x 総排出量の 49%を占め、他の排出物質の場合に比べ割合が高かった。

4.3 SO_x 排出量の算出結果

UFC 橋と PC 橋の SO_x 排出量はそれぞれ 226kg と 156kg であり (図-5), UFC 橋は PC 橋に対して排出量が 45%増加していた。CO₂ や NO_x の排出量と同様に下部工と仮設工における削減効果は認められたが, 上部工での増加分が減少分を上回った。上部工での増加は桁の蒸気養生時の排出量が多いことに起因し, UFC 橋の SO_x 総排出量の 65%は蒸気養生時に発生した。

4.4 ばいじん排出量の算出結果

UFC 橋のばいじん排出量は、PC 橋に対して 76%増加していた。(図-5) SO_x 排出量と同様に下部工と仮設工では排出量の低減が著しいが, 上部工での排出量の増加が減少分を上回った。上部工での増加は桁の蒸気養生時の排出量が多いことに起因し,蒸気養生時の排出量は UFC 橋のばいじん総排出量の 81%を占めた。また, ばいじんの排出量は NO_x 排出量と同様に建設機械の稼働による排出量に依存した。UFC 橋では部材の軽量化や施工の省力化などにより, “輸送”, “現地施工” での排出量の削減が確認できた。

5. 環境への影響評価

UFCを適用することにより CO₂とNO_xの排出量は低減できるが, SO_xとばいじんの排出量は増加していることが分かった。環境への影響を比較する場合, 着目する環境負荷要因により結果が異なる可能性がある。そのため, 算出された各排出量を基に, 重み付け係数等を用いて, 地球温暖化などの環境負荷項目毎に評価することや, 環境への影響を単一指標で表し総合的に評価することが必要である。このように単一指標で表す評価手法を統合化手法といい, 各国の事情に合せた様々な手法が開発されている。

まず UFC 橋と PC 橋について算出した排出量を基に, 影響が地球規模または広域におよぶ地球温暖化や酸性化について評価を行った。次に, 環境に及ぼす総合的な影響について, 統合化手法の 1 つである Ecological Scarcity¹³⁾で比較した。

地球温暖化については, 本検討では温暖化ガ

スのうち, 主要な成分でありインベントリデータの利用が可能な CO₂ について検討した。UFC 橋では PC 橋と比較して CO₂ 排出量が 27%削減していた。

酸性化は, 本検討では酸性化の主要な原因物質である NO_x, SO_x を対象とし, 酸性負荷指数を式(1)に従って求めた¹⁴⁾。

$$L_{AC} = L_{SO_x} + 0.7 \times L_{NO_x} \quad (1)$$

ただし, L_{AC} : 酸化負荷指数 (kg-SO₂) L_{SO_x} : SO_x 排出量 (kg-SO_x) L_{NO_x} : NO_x 排出量 (kg-NO_x)

UFC 橋と PC 橋の酸化負荷指数はそれぞれ 400kg-SO₂, 460kg-SO₂であった。UFC 橋の SO_x 排出量は PC 橋より多かつたが, NO_x 排出量が削減されたため, 約 10%の低減効果を見込むことができた。以上から地球温暖化及び酸性化に関して, UFC の適用により環境への影響を抑制できることが示された。

統合化手法の Ecological Scarcity¹³⁾は, 排出許容量に関わる重み付け係数 eco-factor (UBP/g) (表-4) を用いて, 環境負荷要因から直接単一指標 eco-point (UBP) を算出する手法である。(図-7)。UFC 橋は PC 橋に比べて約 20%小さな値となった。環境影響を総合的に評価した場合においても UFC の適用により環境への影響を低減できることが確認できた。

表-4 Ecological Scarcity の重み付け係数¹³⁾

環境負荷項目	CO ₂	NO _x	SO _x	PM
Eco-factor(UBP/g)	0.2	67	53	110

UBP:Environmental impact points

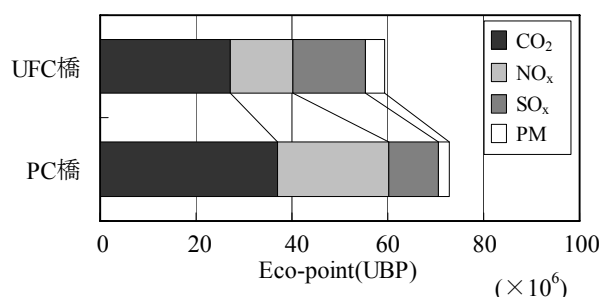


図-7 Ecological Scarcity による統合化の結果

6. 結論

(1) UFC 橋の CO₂, NO_x, SO_x, ばいじんの排出量を PC 橋の場合と比較した。今回の事例では CO₂ と NO_x の排出量については環境負荷を低減できるが, SO_x とばいじんの排出量では環境負荷を増加させていた。

(2) これらの環境への影響を評価するため, 地球温暖化, 酸性化への影響評価, Ecological Scarcity による総合的な影響評価を行なった結果, いずれの環境影響についても UFC の適用による低減効果が確認され, その程度は各々の評価指数において 10~30% の低減であった。

(3) UFC 橋における環境負荷の低減効果は, 橋脚の省略により果たされていた。すなわち, 材料開発の観点から環境負荷を低減するためには構造系を大幅に合理化できるような性能の向上が必要である。また構造物の環境負荷を低減できる UFC であっても, 養生等の特殊性に起因する環境負荷量の増加が顕著であったことから, 養生に要するエネルギーの低減のための材料や技術開発を行う必要がある。

本論文では, 評価の対象に「供用期間」, 「解体・廃棄段階」を含めなかったが, 対象範囲を広げることで, 評価結果が異なる可能性がある。また, 1つのケーススタディーとして負荷量の算定や統合化を行ったが, 評価手法やインベントリデータの標準化は十分ではなく, 今後建設産業が社会に対して果たす使命や責任を考慮して, 適切に進めることが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省: 国土交通省 HP, 環境ポータルサイト <http://www.mlit.go.jp/>
- 2) (社)日本建設業団体連合会, 土工協, 建築協: 建設業の環境保全自主行動計画(第3版), 2003.2
- 3) 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, 土木学会コンクリート技術シリーズ No.44, 2002
- 4) 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, 2004
- 5) 土木学会 コンクリート委員会 示方書小委員会環境側面検討部会: 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, 2005
- 6) 日本経済団体連合会: 経団連環境自主行動計画, 建設, <http://www.keidanren.or.jp/japanese/policy/pol133/g04.html>
- 7) 例えば Richard, P. and Cheyrezy, M. H.: Reactive Powder Concrete with high ductility and 200-800MPa compressive strength, Concrete Technology Past Present and Future, ACI, SP144-24, pp.507, 1994
- 8) Sakai, K.: Environmental design for concrete structures, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.3, No.1, pp.17-28, Feb.2005
- 9) 石原明日子, 大脇英司, 武者浩透, 新藤竹文: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた橋梁構造物の CO₂ 排出量削減効果, 第 60 回土木学会年次学術講演会, V-200, 2005.4
- 10) 武者浩透ほか: 無機系複合材料 (RPC) を用いた酒田みらい橋の設計と施工, 橋梁と基礎, Vol.36, No.11, pp.1-10, 2002
- 11) 田中良弘ほか: PC 橋梁に用いた高強度繊維補強コンクリートの用途開発, コンクリート工学, Vol.41, No.3, pp.26-32, 2003
- 12) 南齋規介, 森口祐一, 東野達: 産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID)—LCA のインベントリデータとして—, 国立環境研究所地球環境研究センター, 2002
- 13) Brand G et.al.: Bewertung in Ökobilanzen mit der Methode der ökologischen Knappheit—Ökofaktoren 1997; BUWAL Schriftenreihe Umwelt Nr. 297, 1998
- 14) サイエンスフォーラム: 戦略 LCA 研究フォーラム LCA 製品の環境ライフサイクルアセスメント, 1994