論文　PC・鋼橋比較設計における環境負荷評価と環境負荷低減の総合評価落札方式への適用

土井　雄生[*1]・堺　孝司[*2]・草薙　悟志[*3]・入谷　祥王[*4]

要旨：建設分野における環境負荷低減のためには環境負荷の定量化が必要であるが，ほとんど行われていないのが現状である。本研究では，山間部の高架橋建設を対象に，構造・基礎形式等の異なる PC・鋼橋比較設計 3 案について環境負荷を定量的に評価した。その結果，CO_2 排出量は，資材製造が約 90%を占めること，PC 橋よりも鋼橋のほうが多くなること等が明らかになった。さらに，環境負荷低減等を考慮した総合評価落札方式を高架橋工事の予定価格に基づいて検討した結果，除算方式と加算方式で落札結果が大きく異なることが明らかになった。

キーワード：高架橋，環境負荷，インベントリ分析，総合評価落札方式

1. はじめに

現在，地球温暖化や資源の枯渇などの問題が深刻化しており，環境負荷低減に向けた取り組みが必須となっており，環境負荷を定量的に評価することが必要であるが，建設分野においてはほとんど行われていないのが現状である。小嶋ら[1),2)]は，国道の地下道建設を対象にして，ライフサイクルの中の資材製造，各種輸送，および施工の環境負荷の算定を行っている．環境負荷として CO_2 等のインベントリ分析を行うとともに，統合化による環境負荷の定量的評価を行っている。

本研究は，山間部の高架橋工事を対象に，構造・基礎形式等の異なる PC･鋼橋比較設計 3 案について環境負荷を定量化し，それらを分析・評価した。さらに，建設分野において環境負荷低減を図るための 1 つの方策として，総合評価落札方式に注目した。この方式を，上記の高架橋工事の予定価格に基づいて除算方式および加算方式に適用し，落札特性について検討した。

2. 高架橋建設による環境負荷評価

2.1 対象構造物

(1) 概要

本研究で対象としたのは，徳島県に建設され，現在供用されている木岐高架橋である。

木岐高架橋は，全長 225m，形式が 5 径間連続 PC ラーメンの橋梁である．**写真－1** に木岐高架橋の全景を示す。木岐高架橋は実際に建設する前に構造・基礎形式などが異なる設計案が 3 案検討され，コストから最終的な設計案が決定されている。本研究では，実際に建設されなかった案も含め，3 案それぞれについて環境負荷量を算定し，その特徴について検討することにした。

(2) 比較設計 3 案

比較設計 3 案の基本的なデータを**表－1** に示す。

2.2 インベントリ分析

(1) 概要

高架橋建設による環境負荷を各種の環境負荷原単位を用いて定量的に評価する。本研究では，基本的に，土木学会発行の「コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)」[3)]に掲載されている原単位を用いて環境負荷量の算定を行った。その中で原単位の得られないものについては，別途考慮した。

インベントリ分析は，資材製造，輸送，施工，工場製作に分類して行った。

(2) 資材製造

写真－1　木岐高架橋全景

*1 香川大学大学院　工学研究科安全システム建設工学専攻　(正会員)
*2 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)
*3 （株）四電技術コンサルタント　土木技術部部長　(正会員)
*4 （株）四電技術コンサルタント　道路部課長　(非会員)

表－1　比較設計 3 案の基本データ

	形式	工事価格
第 1 案	5 径間連続 PC ラーメン橋	8 億 6300 万円
第 2 案	5 径間連続鋼箱桁橋	9 億 5300 万円
第 3 案	3 径間連続 PC ラーメン橋 +単純 PC 橋	9 億 5800 万円

建設に用いられた主な材料は，コンクリートの材料，コンクリート，型枠，鉄筋，鋼材である。また，第 2 案では，工場製作時，現場での架設時，設計時に計画された 50 年に 3 回行う維持管理の際の塗装に使用する塗料製造の環境負荷を考慮した。コンクリートの材料として考慮したのは，セメント，細骨材，粗骨材，混和剤である。水に関しては，負荷量が非常に小さいため除外した。今回のケースでセメントは，普通ポルトランドセメント，早強セメント，高炉セメントを使用している。標準配合のデータは，香川県の生コン工場の 5 社の平均の値を使用した。鋼材として対象としたのは，PC 鋼線と伸縮装置である。第 2 案では，鋼材について伸縮装置，主桁材料を対象とした。

(3) 輸送

輸送による環境負荷は，まず，実際の木岐高架橋工事で使用された材料の搬入先を調査し，それを基に輸送手段・距離を決定した。輸送による環境負荷の対象は，コンクリートの材料，コンクリート，型枠，鉄筋，鋼材とした。さらに，第 2 案では，塗料の輸送についても考慮した。また，輸送の帰路については行きの 7 割の量を運んだと仮定した。

コンクリートの材料の輸送による環境負荷の対象は，セメント，細骨材，粗骨材，混和剤とした。実際の木岐高架橋工事でコンクリートを供給した生コン工場を調査し，4 社の生コン工場が利用されていることがわかった。その中で，現場に最も近い生コン工場が，今回の工事で実際に使用した材料を材料入手地点から選定した生コン工場に輸送し，そこから現場まで輸送することに仮定した。

型枠については，輸送に関するデータが得られなかったため，徳島市から輸送したと仮定した。

鉄筋については，実際の木岐高架橋工事で鉄筋を供給した工場を調査し，その中で，使用量の多い工場を 1 社選定し，そこから現場まで輸送したと仮定した。

鋼材については，PC 鋼材と伸縮装置を対象とした。PC 鋼材については，鉄筋と同様の仮定をし，伸縮装置については，輸送に関するデータが得られなかったため，今回の工事の規模，位置を考慮し，製造工場を仮定し，輸送距離を算定した。第 2 案の主桁材料の製造工場については最も近い製鉄所とした。主桁材料の輸送は，船及びトレーラによる輸送を考慮し，トレーラのスピードは 40 (km/h)と仮定した。

第 2 案の塗料の輸送による環境負荷は，設計案に示された塗料を実際に製造している工場を 1 社選定し，輸送距離を算定した。

表－2 に各案の輸送に関するデータおよび材料の使用量を示す。

(4) 施工

施工による環境負荷は，施工の際に，機材を動かすことによる燃料消費によるものである。施工量，施工機械の種類，施工機械の能力について調査し，施工機械の一日あたりの標準稼働時間と燃料消費量のデータは，建設機械等損料表 [4]のデータを使用した。歩掛は，国土交通省土木工事積算基準 [5]のデータを使用した。

表－3 に各案の計算に用いた施工に関するデータの一覧を示す。また，式(1)に施工による環境負荷算定式を示す。

$$\text{環境負荷量} = \text{施工量} \times \text{歩掛} \times \text{稼働時間} \times \text{燃料消費量} \times \text{原単位} \tag{1}$$

(5) 工場製作

第 2 案は，桁を工場で製作している。工場製作による環境負荷は，まず，ある鋼材加工の工場にある期間のエネルギー使用量と労務時間の調査を行った。この 2 つのデータより，エネルギー使用量を労務時間で除して，一時間あたりのエネルギー使用量を算定した。これに，今回の工場製作の労務時間を乗じ，さらに原単位を乗じることにより工場製作による環境負荷を算定した。用いた原単位は，液化酸素製造については LCA 日本フォーラム [6]のものを，それ以外は，土木学会発行のコンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)のものを用いた。しかし，調査した工場の規模は比較的小さく，単純な作業が中心で，今回の木岐高架橋のような規模の鋼材加工を取り扱うようなところではないため，調査したエネルギー量よりも多くのエネルギーを使用し，実際の環境負荷は計算した環境負荷と異なる可能性がある。

表－2　各案の輸送に関するデータ

材料名	手段	距離 (km)	輸送量（使用量）(t)		
			1 案	2 案	3 案
セメント	船舶	80	2381	1375	2377
	トラック	48			
細骨材	船舶	30	5028	3378	5053
粗骨材	ダンプ	21	6771	4398	6804
混和剤	トラック	160	28	17	28
コンクリート(m^3)	アジテータ	11	6752	4349	6776
型枠	トラック	45	20	35	23
鉄筋	トラック	110	852	593	846
伸縮装置	トラック	181	7	7	13
PC 鋼より線	船舶	102	62	-	83
	トラック	38			
桁材料	船舶	94	-	641	-
	トラック	38			
塗料(工場製作)	トラック	192	-	2	-
塗料(維持管理)		21		11	

表－3　各案の施工に関するデータ

工種		単位	施工量		
			1 案	2 案	3 案
コンクリート工		m^3	5981	3754	5909
PC ケーブル工		t	62	-	83
ゴム支承据付工		個	4	-	14
架設工		式	-	1	1
舗装工		m^2	4412	4430	4473
支保工		空 m^3	45261	504	39878
		m	330		280
型枠工		m^2	2412	2374	2659
鉄筋工		t	373	291	383
足場工		掛 m^2	2417	2751	2273
場所打ち杭工		本	40	30	43
深礎工	掘削土留(A 工法)	本	2	2	2
	グラウト注入	m^3	26	18	23

2.3 各案の比較

図－1 から**図－4** にそれぞれ各案の CO_2，SO_X，NO_X，煤塵排出における各段階の割合を示す。**図－1** から**図－4** より，第 1 案と第 3 案については，どの排出量においても，トータルの環境負荷量及び資材製造・輸送・施工の割合に大きな違いはない。この結果は，**表－3** からもわかるように第 1 案と第 3 案では工種や数量に違いがみられるが，今回の設計では PC 橋梁の形式の違いが環境負荷量にはほとんど影響を及ぼさなかったことを意味している。

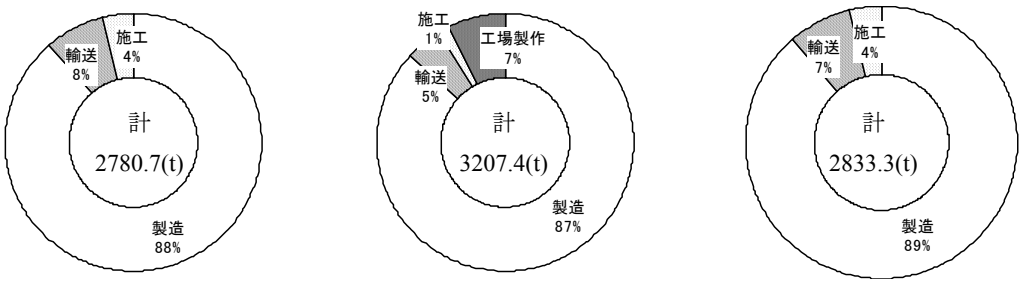
環境負荷の資材製造・輸送・施工・工場製作の割合について**図－1** から**図－4** よりわかるが，鋼橋では，PC 橋と比べてどの排出物質においても工場製作の分が大きくなり，その分施工によるものが小さくなっている。前述したように，工場製作の環境負荷は実際には計算した環境負荷と異なる可能性がある。以下に，PC 橋と第 2 案である鋼橋の環境負荷の特徴について詳しく述べる。

CO_2 排出量に関しては，どの案も資材製造によるものの割合が大きく，約 90%を占めている。第 1 案と第 2 案を比較すると，鋼橋のほうが，約 400t 排出量が多い結果となった。第 1 案ではコンクリートの材料製造が全体の 54%，鉄筋製造が 25%であるのに対し，第 2 案では，桁材料製造が全体の 43%，コンクリートの材料製造が 26%となった。また，第 2 案の塗料製造によるものの割合は，0.014%となっていて非常に小さい。塗料製造による環境負荷は，どの環境負荷物質においても非常に小さかった。

これらの結果から，この規模の橋梁の場合，鋼材の原単位に起因して鋼橋の方が CO_2 排出量は大きくなると言える。

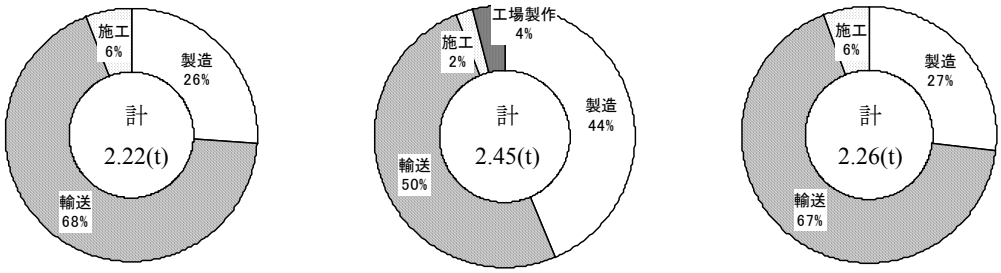
SO_X 排出量に関しては，輸送によるものの影響が最も大きく，第 1 案では 68%，第 2 案では 50%となっている。また，第 2 案では資材製造による影響も大きく，その割合は 44%となっている。両案の SO_X 排出総量を比較すると，CO_2 と同様に第 2 案のほうが多くなっている。SO_X 排出源について見ると，第 1 案ではコンクリート材料輸送が全体の 65%，第 2 案ではコンクリート材料輸送が全体の 37%，桁材料製造が 31%を占める。これらの結果は，コンクリートに関しては**表－2** に示すように骨材の船舶輸送に起因し，桁材料製造については SOx 排出原単位が大きいことによる。

NO_X 排出量に関しては，どの案も資材製造と輸送によるものの割合が同程度で大きい．資材製造と輸送の内訳に関しては，資材製造によるものが，第 1 案は 45%，第 2 案は 49%，輸送によるものが両案ともに 39%となっている。NOx 排出総量を第 1 案と第 2 案で比較すると，CO_2，SO_X とは異なり，PC 橋の第 1 案のほうが多い結果となっている。両案ともにコンクリート材料の製造と輸送によるものの割合が大きい。特に，第 1 案ではセメント製造と骨材輸送，第 2 案では桁の鋼材製造と骨材輸送によるものが大きい。



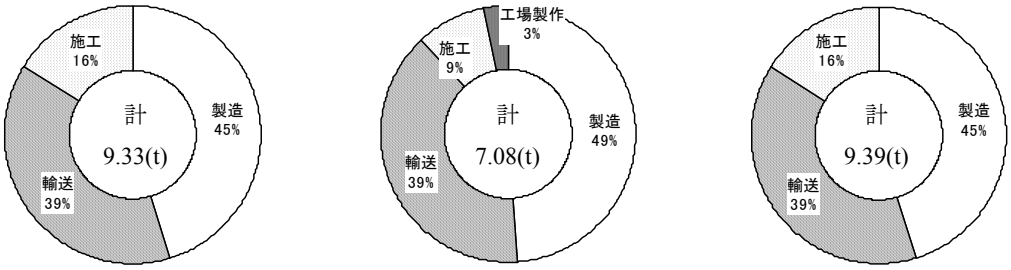
(a)第 1 案　　(b)第 2 案　　(c)第 3 案

図－1　各案の CO_2 排出における各段階の割合



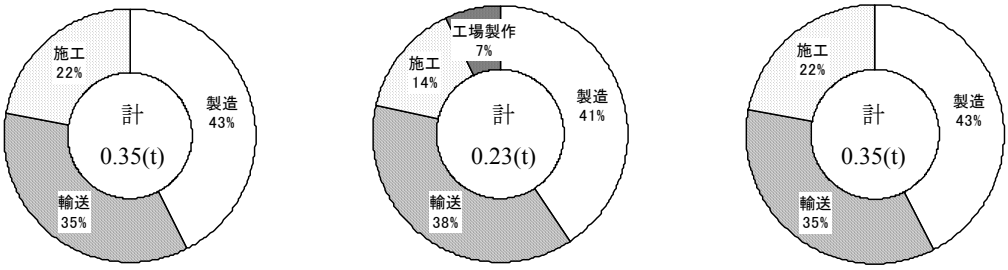
(a)第 1 案　　(b)第 2 案　　(c)第 3 案

図－2　各案の SO_X 排出における各段階の割合



(a)第 1 案　　(b)第 2 案　　(c)第 3 案

図－3　各案の NO_X 排出における各段階の割合



(a)第 1 案　　(b)第 2 案　　(c)第 3 案

図－4　各案の煤塵排出における各段階の割合

煤塵排出量に関しては，NO_X と同様に資材製造と輸送によるものの割合が同程度で大きい．製造と輸送の内訳に関しては，第 1 案では，資材製造によるものが 43%，輸送によるものが 35%，第 2 案では，資材製造によるものが 41%，輸送によるものが 38%となっている。煤塵排出総量について見れば，NO_X と同様に第 1 案のほうが多くなっている。両案ともにコンクリート材料の製造と輸送によるものの割合が大きく，NO_X と同様の傾向を示している。また，他の環境負荷物質と比較して施工によるものの割合が大きく，第 1 案では 22%，第 2 案では 14%を占める。

3. 環境負荷低減等の総合評価落札方式への適用

3.1 概要

建設分野において，環境負荷低減を図るための方法として，総合評価落札方式に注目した。

現在，総合評価落札方式では，評価値の算定方法として除算方式と加算方式がある。それぞれの評価値算定式を式(2)および式(3)に示す。

・除算方式

$$\text{評価値} = \frac{\text{技術評価点}}{\text{入札価格}} = \frac{(\text{標準点} + \text{加算点})}{\text{入札価格}} \tag{2}$$

・加算方式

$$\text{評価値} = \left[100 \times \left(1 - \frac{\text{入札価格}}{\text{予定価格}}\right)\right] + \text{技術評価点} \tag{3}$$

ここでは，環境負荷低減等を考慮した総合評価落札方式を木岐高架橋工事の入札予定価格に基づいて検討することとした。

3.2 加算点に関する考え方

加算点に関する考え方として，「価格以外の実質的に意味のある技術提案による入札総合評価値が，価格以外の要素を考慮しない，あるいは考慮しても評価されない調査基準価格での評価値より小さくなることを避けること」を基準とした。この考え方に基づいた加算点決定のための式を，それぞれ式(4)および式(5)に示す。

・除算方式

$$\frac{(100 + \alpha(\text{加算点}))}{(\text{予定価格})} \geq \frac{(100 + 0)}{(\text{調査基準価格})} \tag{4}$$

・加算方式

$$\left[100 \times \left(1 - \frac{\text{予定価格}}{\text{予定価格}}\right)\right] + \alpha(\text{加算点}) \geq \left[100 \times \left(1 - \frac{\text{調査基準価格}}{\text{予定価格}}\right)\right] + 0 \tag{5}$$

これらの式より導出される α の最小値を最小加算点とし，各評価項目に最小加算点および任意に設定した最大加算点を配分する。

3.3 評価項目と重み付け

本研究では，問題を単純化して，評価項目として環境面とその他の 2 つの評価項目で評価する。その他には，維持管理，機能確保，施工実績等を総合化した評価項目と考えることができる。

項目間の重み付けについては，階層構造分析法(AHP法)[7]を用いて，**表－4** に示すように，発注者，受注者，および大学院生毎に求めた重みを用いた。

表－4　使用した重み

項目	発注者	受注者	大学院生
環境	0.264	0.257	0.316
その他	0.736	0.743	0.684
計	1	1	1

表－5　入札条件

予定価格	1,252,440,000 円
調査基準価格	1,001,952,000 円
最大加算点	50 点

表－6　各社の仮想提示内容

入札者	A 社	B 社	C 社
価格	低	やや低	中
環境面	低	やや高	やや低
その他	低	低	中
入札者	D 社	E 社	F 社
価格	中	やや高	高
環境面	中	高	中
その他	中	やや高	高

3.4 評価値の算定

木岐高架橋工事を基に，除算方式と加算方式それぞれ評価値を算定し，評価値や落札者がどのように変化するかを検討した。**表－5** に，木岐高架橋の予定価格と調査基準価格を 8 割とした入札条件を示す。最大加算点を 50 点と仮定し，式(4)，式(5)の α を算出すると，除算方式では 25 点，加算方式では 20 点となり，これらをそれぞれの最小加算点とした。

入札には 6 社が参加するとし，評価項目は，前述した様に，価格に環境とその他を加えた。**表－6** に，各社の仮想提示内容を示す。例えば，A 社は，価格だけを下げ，環境面等の提案のない場合，E 社は，価格は高いが，環境負荷低減を積極的に行った社を想定している。そして，「低」には加算点の最小値を，また「高」には加算点の最大値を与え，その他については適当に加算点を決めた。実際に，評価値の算定に使用した入札価格を**表－7** に，除算方式と加算方式の加算点をそれぞれ**表－8** および**表－9** に示す。入札価格は，A 社に調査基準価格と同じ価格を，F 社に予定価格と同じ価格を与えている。その他の社については，A 社から順に増加させている。さらに，この加算点に前述した重みを項目ごとに乗じ，最終的な加算点を算出し，評価値を算定した。除算方式と加算方式の評価値算定結果をそれぞれ**表－10**，**表－11** に示す。除算方式の評価値の値は 10^8 を乗じた値を示している。

表－10 及び**表－11** 中の下線付き数値は最大評価値を示している。算定結果から分かるように，除算方式，加算方式ともに重みの属性により落札者が変わることはなかった。これは，属性が大学院生の場合，環境の項目が他の 2 つに比べ重みが若干大きくなっているものの，全体としてそれらにほとんど差違がなかったためである。**表－10** より，除算方式では，環境面等に関する評価

表－7　各社の入札価格

	A 社	B 社	C 社	D 社	E 社	F 社
入札価格(円)	1,001,952,000	1,052,049,600	1,102,147,200	1,152,244,800	1,202,342,400	1,252,440,000

表－8　除算方式の加算点

	A 社	B 社	C 社	D 社	E 社	F 社
環境	25.00	43.75	31.25	37.50	50.00	37.50
その他	25.00	25.00	37.50	37.50	43.75	50.00

表－9　加算方式の加算点

	A 社	B 社	C 社	D 社	E 社	F 社
環境	20.00	42.50	27.50	35.00	50.00	35.00
その他	20.00	20.00	35.00	35.00	42.50	50.00

表－10　除算方式での評価値算定結果

	A 社	B 社	C 社	D 社	E 社	F 社
発注者	12.476	12.352	12.326	11.933	12.093	11.713
受注者	12.476	12.340	12.330	11.933	12.090	11.720
大学院生	12.476	12.445	12.296	11.933	12.120	11.661

表－11　加算方式での評価値算定結果

	A 社	B 社	C 社	D 社	E 社	F 社
発注者	40.000	41.935	45.022	43.000	48.478	46.043
受注者	40.000	41.787	45.071	43.000	48.429	46.142
大学院生	40.000	43.114	44.629	43.000	48.871	45.257

が期待されず，価格のみを下げることを想定したA社が落札者となっている。この結果から，除算方式では環境面の提案等が適切に評価されず，評価値は入札価格によってほとんど決まってしまうことが明らかとなった。これに対して，**表－11** から分かるように，加算方式では，価格が2番目に高く，加算点を高く設定したE社が落札している。この結果から，加算方式では価格以外の要素が評価値に非常に効いてくることが明らかとなった。同表より，価格が最も安く，環境面等の提案がないと想定したA社の評価値が最も小さくなっていることからも加算点の影響が大きいことは明らかである。また，入札価格の最も高いF社の評価値は入札価格の最も低いA社の評価値よりも大きくなっており，価格が高くても環境面等の提案が高く評価されれば，価格が安いだけの社に負けない評価値を得ることが明らかとなった。

4. 結論

(1) 高架橋建設による環境負荷について，PC 橋である第1案と第3案は，どの排出物質においても環境負荷排出総量及び資材製造・輸送・施工の排出割合に大きな違いはなく， 今回の設計では PC 橋の形式の違いが環境負荷量にほとんど影響を及ぼさないことが明らかとなった。

(2) 環境負荷の資材製造・輸送・施工・工場製作の割合について，鋼橋では，PC 橋と比べてどの排出物質においても工場製作の分が大きくなり，その分施工によるものが小さくなっている。

(3) 高架橋建設による環境負荷について，CO_2 排出量は資材製造によるものの割合が大きく，どの案でも約90%を占めている。また，この規模の橋梁の場合，CO_2 排出量は鋼材の原単位に起因して鋼橋の方がPC 橋よりも大きくなると言える。SO_X 排出量は，輸送によるものの割合が大きく，どの案でも 50%以上を占めている。NO_X および煤塵排出量については，資材製造と輸送によるものの割合が同程度で大きく，また，排出総量は第2案の鋼橋が最も小さい結果となった。

(4) 環境負荷低減等の総合評価方式への適用に関して，除算方式では，評価値が入札価格によってほとんど決まってしまうこと，加算方式では，付加的な要素が評価値に大きく影響し，高い価格での入札でも逆転落札が起きやすいことが明らかとなった。

参考文献

1) 小嶋克宏・堺孝司・入谷祥王・草薙悟志：交通渋滞道路における地下道および鉄道高架橋建設による環境便益，コンクリート工学年次論文集，Vol.28,No.2,pp.1645-1650,2006.

2) 堺孝司・小嶋克宏・草薙悟志・入谷祥王：交通渋滞交差点における鉄筋コンクリート地下道建設による環境便益評価に関する研究，土木学会論文集 G, Vol.63,No.1,pp.40-50,2007.

3) 土木学会：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

4) 日本建設機械化協会：建設機械等損料表 平成 17 年度版，2005

5) 建設物価調査会：国土交通省土木工事積算基準 平成 18 年度版，2006

6) 産業環境管理協会：LCA 日本フォーラム (http://www.jemai.or.jp/lcaforum/)

7) 高萩栄一郎・中島信之：Excel で学ぶ AHP 入門，株式会社オーム社，2005.9