

論文 環境配慮型材料設計のためのコンクリートの環境負荷性評価

李 柱国^{*1}・稲井 栄一^{*2}・大久保 孝昭^{*3}

要旨: コンクリートの環境配慮型調合設計のニーズに応える環境性能の評価手法を提案し、環境性能の評価に考慮すべき、かつ考慮可能な環境影響項目を現状に即して抽出・整理した。さらに、一部のコンクリート用材料の環境影響原単位を整備した。また、コンクリートに従来から要求される性能（強度、耐久性など）の統合化手法と環境効率の算定手法を提案した。フライアッシュを用いたコンクリートの環境性能指数および環境効率を定量的に評価することによって、提案した評価手法の妥当性を検証するとともに、環境性能の評価に基づいた廃棄物のコンクリートへのリサイクルを最適化する方法を考察した。

キーワード: コンクリート, 環境性能, 環境負荷要因, 一般性能指数, 環境効率, リサイクル

1. はじめに

使用量が膨大なコンクリート材料は、建設分野の環境負荷の主な要因の一つと特定されており、その環境負荷を低減することは、持続可能な開発を実現するための緊急な課題と考えられる。近年、コンクリートの分野では、従来より多量の廃棄物や多種多様な再生材の使用を目的とした研究が活発化しており、廃棄物や再生材を利用する技術が急速に進んでいる。再生材を使用してもコンクリートの環境負荷が必ずしも小さくなるとは限らず、どのようなコンクリートにどのような材料を使ったら、環境負荷の小さいコンクリートが造れるかを合理的に判断しながら、コンクリートの材料設計手法を確立する必要がある。

著者らは、既報¹⁾において、この背景を踏まえて、コンクリートの環境性能の評価手法と環境配慮型調合設計法を提案した。コンクリートの環境性能は、その製造などの行為によって環境に及ぼす影響の程度と定義されている²⁾。コンクリートのライフサイクルにおいては、地球・地域・作業環境に負荷を与える要因は、資源消費、廃棄物排出、土地利用改変などを含めて多岐にわたる。現段階においては、定量的に評価できないもの、また考慮しても環境配慮型調合設計の結果に大きな

影響を与えないものが存在する。本研究では、この現状に鑑みて、既報に引き続き、コンクリートの環境配慮型調合設計のための環境性能評価手法をより詳細に検討し、その定量的評価に考慮すべき、かつ考慮可能な環境負荷要因を抽出・整理する。また、コンクリートに従来から要求される性能（強度、耐久性など）の統合化手法を提案するとともに、環境効率の算定手法を検討する。最後に、フライアッシュを用いたコンクリートの環境性能と環境効率を定量的に評価し、土地利用改変をコンクリートの環境影響要因とする必要性を述べるとともに、廃棄物利用の環境負荷低減効果に及ぼす再生利用方法、輸送距離などの影響を考察する。

2. 環境配慮型材料設計のための環境性能指数

2.1 本研究における環境性能の定義

コンクリートの原材料の採取や製造・練混ぜ・施工・維持管理および解体・処分のライフサイクルでは、資源が消費されると共に、汚染物が大気、水圏および土壌に排出され、作業時に振動・騒音も発生する。また、骨材の採取は、土地利用を改変して生態環境を破壊する。コンクリートの環境負荷を評価するには、地球・地域・作業環境に与える各段階の影響を全面的に考慮すべきである。

*1 山口大学 大学院理工学研究科助教授 博士(工学) (正会員)

*2 山口大学 大学院理工学研究科助教授 工博 (正会員)

*3 広島大学 大学院理工学研究科社会環境システム専攻教授 工博 (正会員)

一方、コンクリートの種類が異なっても、それらの輸送や解体・処分による環境負荷には大差がない。また、環境配慮型調合設計法によって製造される低環境負荷のコンクリートのコンシステンシー、力学的性質、耐久性などは通常のコンクリートと同等レベルに設定されるため、その施工および維持管理段階における環境負荷も通常のコンクリートの場合とほぼ同等であると思われる。

低品質再生骨材、スラグ骨材などを利用したコンクリートの耐久性が懸念されているが、コンクリートの用途と供用時の環境条件に鑑みて、日本工業規格や学・協会の作成したガイドラインなどによって、再生材の種類、品質および使用量を適正に選定すれば、製造したコンクリートの耐久性を確保することが可能と考えられる。

そこで、本研究では、環境配慮型調合設計に用いられる環境性能をコンクリートの製造段階における資源消費、廃棄物の排出・処分および土地利用改変などが環境に及ぼす影響の程度と定義する。

2.2 算定方法

コンクリートの製造は、一次原材料（石灰石、骨材等）の採取、二次原材料（セメント、砕石等）の製造、原材料の輸送および練混ぜの一連のプロセスを含める。したがって、上記のように定義したコンクリートの環境性能指数(EPI)は、式(1)によって与えられる。

$$EPI = \sum_m [(M_m \times I_{pm}) + (\frac{M_m}{1000} \times D_m) \times I_t] + I_{moc} \quad (1)$$

ここに、 M_m : 1m^3 のコンクリートを製造するための原材料 m の量(kg); D_m : 原材料 m の輸送距離(km); I_{pm} : 原材料 m の採取や製造による環境影響原単位 (1/kg); I_t : 輸送方法別の環境影響原単位(1/ t・km); I_{moc} : コンクリート練混ぜの環境影響原単位 (1/ m^3)

2.3 原材料およびプロセスの環境影響原単位

コンクリートの原材料および各プロセス（原材料輸送と練混ぜ）の環境影響原単位 I は、式(2)によって算定される。

$$I = \sum_i [(\sum_j E_{ij}^v - \sum_r E_{ir}^w) \times F_i] \quad (2)$$

ここに E_{ij}^v : コンクリート用材料 j (骨材等)の採取や製造またはプロセス j (練混ぜ等) による環境負荷項目 i (CO_2 等) の量; E_{ir}^w : コンクリート用材料の製造に使用された廃棄物 r (石炭灰等) を処分 (埋立て等) する場合の環境負荷項目 i の量; F_i : 環境負荷項目 i の統合化係数

廃棄物がコンクリートに利用される場合は、その焼却・埋立て等による環境負荷は発生しない。このリサイクルの環境便益をコンクリートの環境性能指数に反映するために、コンクリート用材料の環境影響原単位を算定する際に、式(2)に示すように、当該廃棄物の埋立て等の処理を行うと仮定した場合の環境負荷を減算することにする。

また、式(2)中の環境負荷項目別の統合化係数 F は、日本版被害算定型影響評価手法「LIME」³⁾に掲載されている金銭単位のものを用いればよいと考えられる¹⁾。したがって、式(2)によって得られる環境影響原単位は、単位量の原材料の外部コストの一部となる。

コンクリートの製造が地球・地域・作業環境に影響を与える負荷項目はかなり多い。環境性能の評価に考慮された項目が多いほど、評価結果の信頼性が高いが、前述したように、現段階ではすべての項目を考慮するのは不可能かつ不必要である。この現状に鑑みて、考慮すべき、かつ可能である環境影響項目を以下のように抽出・整理を行う。

(1) 資源・エネルギーの消費

コンクリートの一次原材料は、主に粘土、石灰石および骨材である。川砂・川砂利の枯渇問題が深刻になりつつあり、その消費を環境影響項目として考慮すべきであるが、LIMEは川砂・川砂利消費の環境影響の統合化係数を与えていない。また、石灰石、山砂利の環境影響の統合化係数は、同じ値でLIMEに掲載されているが、それらの採取による土地利用改変の環境影響のみを考慮して得られたものである。本研究では、後述のように土地利用改変も環境影響項目としているため、骨材、石灰石の資源消費を環境影響項目としていない。

一方、石油、石炭、天然ガスおよびウラン鉱石の消費は環境影響項目として考慮する。電力消費

量をこれらの資源の消費量に換算する。

(2) 大気への排出物

燃料の製造と使用の時に排出する温室効果ガス(CO₂, N₂O, CH₄)および大気汚染物(SO_x, NO_x, 煤塵)は、環境影響項目として考慮される必要がある。燃料使用段階の大気汚染物の発生量は、燃焼機関および大気汚染防止設備の設置状況(例えば、脱硫, 脱硝装置)などによって異なるため、排出量の実測値を用いるべきである。燃料使用段階の排出分の実測値がない場合は、燃料製造段階の排出分のみ計上する。

(3) 水圏への排出物

水質汚濁の程度を表す生物化学的酸素消費量(BOD), 化学的酸素需要量(COD), 浮遊物質(SS), 全窒素(T-N)および全リン(T-P)の量は、環境影響項目として考慮される必要がある。ただし、セメント, 生コンおよび骨材工場は、公共用水域に排水するケースが少ない。排水しても通常に排水基準値をクリアしている²⁾。そこで、現段階では、発電と燃料製造による水質汚濁物質の排出分のみを考慮する。また、BODとSSの環境影響統合化係数はLIMEに掲載されていないため、これらの影響を考慮できない。

(4) 土地利用改変

土石, 骨材などの採取および廃棄物の埋立ては、土地利用改変を招く。廃棄物を再利用すれば、その埋立てによる土地利用改変を避けられる。リサイクルの環境便益を正確に反映するために、土地利用改変を環境影響項目とする必要がある。土地利用改変量の算定方法は、既報¹⁾に示されている。

(5) CO₂固定量の減少

日本では、石灰石・山砂・山砂利の採取および最終処分場建設が主に山地で行われるため、森林の面積が減少する。森林面積の減少によるCO₂吸収量の低減量の算定方法は既報¹⁾に報告されている。川・海骨材の採取は、漁業資源に悪影響を及ぼすが、この影響はまだ定量的に評価できない。文献4)には、海洋は、年間世界炭素排出量の1/3を海洋堆積物によって吸収することが示されている。海砂・砂利の採取によるCO₂吸収量の減少は約5.6g/kgである。資源採取によるCO₂吸収の減少量を他のプロセスに

おけるCO₂の排出量に加算する。

(6) 土壌への固形廃棄物排出

固形廃棄物は埋め立てられると、作業中の重機使用, 廃棄物からの有害物質排出および土地利用改変などによって環境負荷が発生する。LIMEに掲載されている廃棄物の環境影響統合化係数は、土地利用改変による環境影響のみを考慮したものである。そこで、本研究では、廃棄物排出を環境影響項目とせず、廃棄物処理による環境影響を、上記の(1)~(5)に示す環境影響項目によって評価する。

(7) 騒音・振動

騒音・振動の環境影響統合化係数がないため、コンクリートの環境性能評価には騒音・振動の影響は考慮しない。

上記の(1)~(5)に示す環境影響項目を考慮し、式(2)によって約40種類のコンクリート用材料(再生材を含む)の環境影響原単位を整備した。紙面の都合で、これらの原単位の算出方法についての説明を省略するが、4章に述べる環境性能の評価例に用いられた材料とプロセスの原単位を表-1に示す。電力の新たな環境負荷原単位を用いたため、表-1に示す環境影響原単位は、既報¹⁾の結果と若干異なっている。

表-1中の環境影響原単位 I は、土地利用改変と森林CO₂吸収量減少を環境影響項目とし、リサイクル材を埋め立てる場合の環境負荷を減算して得られたものである。 I^* の算定には、土地利用改変と森林CO₂吸収量減少を環境影響項目としないが、リサイクル材の埋立てによる環境負荷の減算を行った。 I^{**} は、 I の算定を行う上記の二つの処理をせずに得られたものである。従って、セメントと再生材の場合には、 I, I^*, I^{**} の大小関係は、 $I > I^{**} > I^*$ である。 I, I^*, I^{**} を用いて計算されたコンクリートの環境性能指数は、それぞれ EPI, EPI^* および EPI^{**} と記する。

3. 環境効率

高品質のコンクリートの性能(強度, 耐久性など。以下に、一般性能と略称)は優れるが、その製造にセメントや混和材料が多量に使用されるため、環境性能は低下する恐れがある。そこで、異なる

表-1 一部のコンクリート用材料およびプロセスの環境影響原単位

材料又はプロセス	工業用水 (kg)	普通セメント (kg)	川砂 (kg)	川砂利 (kg)	陸砂 (kg)	碎石 (kg)	FA JIS I (kg)	FA JIS II (kg)	FA JIS IV (kg)	混和剤 (kg)	材料輸送 (t・km)	練混ぜ (m ³)
I (円/*)	1.46E-3	2.049	4.74E-3	6.36E-3	6.36E-3	2.76E-3	0.793	0.5547	-0.131	0.232	1.021	38.4
I*(円/*)	1.40E-3	1.903	4.74E-3	4.74E-3	4.74E-3	2.54E-2	0.874	0.6354	-0.069	0.232	1.021	38.1
I**(円)	1.40E-3	1.920	4.74E-3	4.74E-3	4.74E-3	2.54E-2	0.943	0.7041	0	0.232	1.021	38.1

注：FA：フライアッシュ

品質をもっているコンクリートの環境負荷性を環境効率によって比較するのが有効と考えられる。コンクリートの環境効率 (EE) を、式 (3) に示すように、一般性能の統合化指数 (UPI) と環境性能指数の比によって表す。

$$EE = \frac{UPI}{EPI} \quad (3)$$

コンクリートの環境配慮型調合設計は、一般性能が設計要求を満足することが前提で、環境性能が最も良い調合を選定するのが基本であるが、一般性能を重視し、環境負荷が相対的に小さい調合を選ぶケースもある。この場合に、環境効率を比べて調合を選定すればよいと考えられる。

コンクリートの一般性能は、その用途や使用環境によって多岐であり、各性能の重要度を合理的に設定するのは容易ではない。現在、それについての研究報告が見たらない。本研究では、コンクリートの一般性能を統合化する方法を式 (4) に示すように提案する。コンクリートの一般性能指数 (UPI) の評価結果が大きいほど、その一般性能は総合的に良いといえる。

$$UPI = \frac{1}{n+m} \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{ai}}{P_{si}} \times C_i \right) + \sum_{j=1}^m \left(\frac{P_{bj}}{P_{sj}} \times C_j \right) \right] \quad (4)$$

ここに、 P_{ai} , P_{bj} :それぞれコンクリートの a 類性能 (性

表-2 考慮したコンクリートの性能およびそれらの基準値と統合化係数

性能区分	性能	性能指標	基準値 (P_{si} , P_{sj})	統合化係数 C_i	注	
施工性	a 類	流動性	スランプ (Sl) 又はスランプフロー (Sf)	Sl : 15 cm Sf : 24 cm	0.5	(1)
		分離抵抗性	現段階では考慮しない		0.5	(2)
構造安全性	b 類	強度	28 日圧縮強度 (F_{28})	36 MPa	1.0	(3)
		耐凍害性	耐久性指数 (Rf)	100	0.33	-
耐久性	b 類	中性化抵抗	中性化速度係数	0.222 mm/t ^{1/2}	0.34	(4)
		乾燥収縮	乾燥収縮率 (S)	8×10^{-4} (6 ヶ月) 6×10^{-4} (90 日)	0.33	(5)

注：(1)流動性の指標は、普通コンクリートの場合にはスランプであるが、高流動コンクリートの場合にはスランプフローである。文献5)によって、ワーカビリティが良好であり、スランプが 15cm のコンクリートのスランプフローは 24cm 前後である。したがって、スランプフローの基準値を 24cm とする。(2) 分離抵抗性を合理的に表す指標がないため、現段階では分離抵抗性を考慮しない。(3) 高強度コンクリートの圧縮強度の下限を基準値とする。(4) 文献6)によって、促進試験における中性化係数 = 中性化深さ(mm) / [CO₂濃度(%)×材齢(日) / 5.0]^{0.5}。また、基準値は、50 年後の中性化深さが 3cm となる場合の値である。(5) 文献6)によって、乾燥期間 6 ヶ月の乾燥収縮率が 8×10^{-4} より小さければ、コンクリートのひび割れは発生しにくくなり、 6×10^{-4} より小さければひび割れ発生の危険はより小さい。90 日間の乾燥収縮率は、6 ヶ月の値より小さいわけであるため、安全範囲の下限 6×10^{-4} をその基準値とする。

能の数値が大きいほど性能が良い) と b 類性能 (性能の数値が小さいほど性能が良い) の測定値、 P_{si} , P_{sj} : a, b 類性能の基準値、 C_i , C_j : 各性能の統合化係数

一般のコンクリートの場合に考慮すべき最小限の性能およびそれぞれの基準値を表-2 に示す。UPI を算定するとき、ある性能の測定値がなければ、当該性能を考慮しない。本研究では、コンクリートの施工性、構造安全性および耐久性を同等なレベルの性能を見なし、考慮した性能に配分することによって、各性能の統合化係数を表-2 に示すように設定した。

4. 環境性能と環境効率の評価例

4.1 コンクリートの調合と性能

フライアッシュ(FA)を用いた高流動コンクリートと吹き付けコンクリートの環境性能および環境効率を上記に提案した方法によって評価した。6 シリーズのコンクリートの調合と性能測定値は、文献 7, 8) より表-3 に転記されている。

セメント、骨材およびFAが10t ディーゼルトラックで輸送され、輸送距離がそれぞれ30, 100, 150kmと想定した上で、表-1に示す3種類の環境影響原単位を用いて、各コンクリートのEPI, EPI*, EPI**をそれぞれ算出した。さらに、式(3)によって各コンクリートの環境効率を計算した。

4.2 評価結果の考察

図-1に各コンクリートの一般性能指数(UPI)を示す。同図によれば、JIS II種FAが一部の普通ポルトランドセメントを代替すると、コンクリート(シリーズC-1とC-2)のUPIが小さくなる。置換量が多いほど、UPIが小さい。また、JIS I種FAが一部の陸砂を代替する場合には、コンクリート(S-1)のUPIが大きくなる。しかし、陸砂の一部がJIS IV種FAに代替されたコンクリート(S-2)のUPIは、基準シリーズS-0より小さい。算定した一般性能指数の変化傾向は、コンクリートの性能と一致しており、本研究では提案した一般性能の統合化方法が妥当であると思われる。

各コンクリートの3種類の環境性能指数(EPI, EPI*, EPI**)を図-2に示す。土地利用改変と森林CO2吸収量低減による環境影響を考慮した場合のEPIは、それを考慮しない場合のEPI*とEPI**より大きい。また、FAの埋立ての不要による環境影響便益を考慮したEPI*は、この便益を無視した場合のEPI**より小さい。なお、図-2に示すように、JIS II種FAが普通セメントを代替する場合、EPI, EPI*, EPI**は共にFAの置換量の増加に伴って小さくなる。つまり、FAの使用量が多いほど、コンクリートの環境負荷は小さい。

一方、一部の陸砂がJIS I種FAに代替されたシ

表-3 コンクリートの調合および性能

調合と性能	シリーズ						
	C-0	C-1	C-2	S-0	S-1	S-2	
コンクリートの種類	高流動コンクリート			吹き付けコンクリート			
フライアッシュの種類	JIS II (ρ : 2.33, S_s : 3740)			JIS I (ρ : 2.40, S_s : 5530)	JIS IV (ρ : 2.20, S_s : 1770)		
代替された材料	普通セメント			陸砂			
水セメント比 (%)	30.9	43.5	60.5	54.2	51.4	54.2	
水結合材比 (%)	30.9	30.4	30.2	54.2	40.2	42.4	
置換率 (%)	0	30	50	0	10	10	
調合 (kg/m ³)	水	175	165	159	195	185	195
	普通セメント	567	379	263	360	360	360
	フライアッシュ	0	163	263	0	100	100
	川砂	745	745	745	-	-	-
	陸砂	-	-	-	1075	982	958
	川砂利(2205)	806	806	806			
	砕石				737	748	737
	化学混和剤	8.80	8.33	7.97	4.32	4.32	4.32
スランブフロー (mm)	600~700			-			
スランブ (mm)	-			100~140			
28日圧縮強度(N/mm ²)	70.8	59.5	50.4	27.5	32.9	29.8	
90日乾燥収縮(×10 ⁻⁴)	6.23	6.6	6.2	10.3	6.8	8.35	
耐久性指数(%)	81.5	50.0	8.4	84.0	86.5	46.0	
中性化深さ(91日, mm)	0.5	0.5	8.1	12.5	6.5	11.0	
中性化速度係数	0.05	0.052	0.849	1.31	0.681	1.153	

注: ρ : 密度(g/cm³); S_s : 比表面積 (cm²/g), 川砂と川砂利の表乾密度: 2.57と2.60, 陸砂と砕石の表乾密度: 2.59と2.64, 陸砂と砕石の粗粒率: 2.87と6.19, 砕石の最大寸法: 15mm

リーズS-1は、基準シリーズ(S-0)よりEPI, EPI*, EPI**が共に大きい。これは、JIS I種FAの製造(収集, 分級)による環境影響は、陸砂採取より大きいことである(表-1参照)。また、シリーズS-2のEPIは、シリーズS-0と殆ど同じである。その理由は、FAの運送距離が陸砂の1.5倍であり、運送による環境影響が大きいことである。これによって、廃棄物の利用は、必ずしもコンクリートの環境負荷を低減するわけではなく、その低減効果はリサイクル方法、輸送距離などに依存する。環境性能の評価によって、廃棄物のコンクリートへのリサイクルの適切な方法を適切に決定すればよい。

土地利用改変とCO₂固定量低減の影響を考慮しない場合、シリーズS-2のEPI*(846円/m³)は、基準シリーズS-0の842円/m³より大きい。また、FAを埋め立てる場合の環境影響の減算もしない

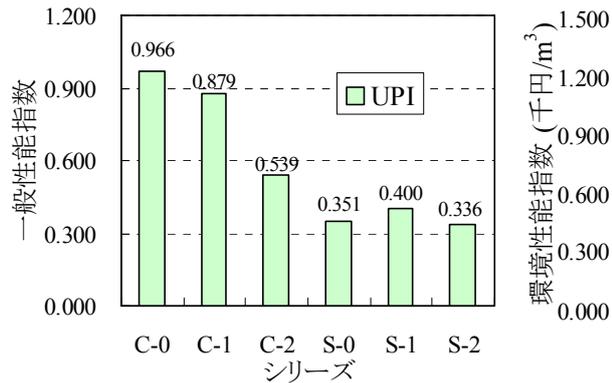


図-1 各コンクリートの一般性能指数

場合においても、S-2のEPI** (859円/m³)のほうが大きい。そこで、廃棄物利用の環境便益を合理的に反映するために、土地利用改変とCO₂吸収量低減を環境影響項目とし、利用された廃棄物を埋め立てる場合の環境影響を減算する必要がある。

上述のように、各コンクリートの環境性能指数(EPI)の評価結果は一般的な知見と一致しており、本研究では提案した環境性能の評価手法(式(1)と式(2))の妥当性が実証されたといえる。

なお、各シリーズのコンクリートの環境効率を図-3に示す。Cシリーズでは、C-1の環境効率(EE)は最も高い。C-2の環境性能は最も良いが、EEは小さい。Sシリーズでは、S-1のEEは最大である。コンクリートの一般性能と環境性能を共に重視する場合に、環境効率によって調合を適切に選定することが可能である。

5. まとめ

本研究では、コンクリートの環境配慮型調合設計のための環境負荷性の評価手法を提案し、その評価に考慮すべき、かつ可能である環境影響項目を抽出・整理した。また、コンクリートの一般性能の統合化手法および環境効率の算定手法を提案した。さらに、フライアッシュを用いたコンクリートの環境性能と環境効率の評価を行い、提案した評価手法の妥当性を検証した。評価結果より以下の主な知見を得た。

- 1) 廃棄物利用の環境負荷低減効果は、リサイクル方法、輸送距離などに依存する。環境性能の評価によって廃棄物のコンクリートへのリサイク

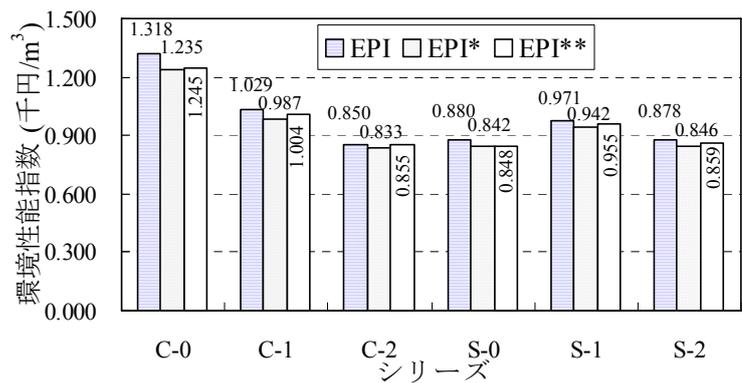


図-2 各コンクリートの環境性能指数

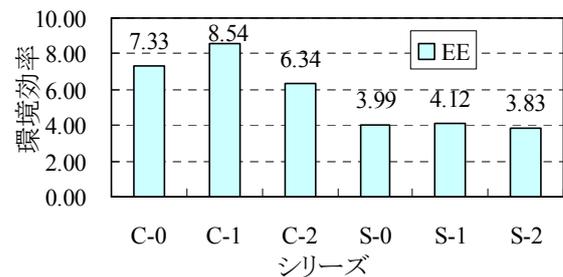


図-3 各コンクリートの環境効率

ルを最適化することが必要であり、本研究では提案した環境負荷性の評価手法を利用すれば、リサイクルの最適化が可能となる。

- 2) 再生材利用の環境便益を合理的に反映するためには、土地利用改変および森林・海洋CO₂吸収量の低減を環境影響項目として加える必要がある。

参考文献

- 1) 李柱国, 山本泰彦, 大久保孝昭: コンクリートの環境性能評価法と環境配慮型調合設計法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1373-1378, 2006
- 2) 日本土木学会: コンクリート構造物の環境性能調査指針(試案), pp.4-52, 2005
- 3) 社団法人 産業環境管理協会: 製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発成果報告書, pp.719-918, 2004.3.
- 4) 株式会社 京星のホームページ参照: <http://www.concle.co.jp/kankyo.htm>
- 5) 日本建築学会: コンクリートの早期迅速試験方法集, pp.106-108, 1985.
- 6) 日本建築学会: コンクリートの調合設計指針・同解説, pp.152-172, 1999.
- 7) 成田健ほか: フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.925-930, 2001
- 8) 油野ほか: 分級フライアッシュを用いた吹付けコンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.91-96, 2000.