

論文 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

李 柱国^{*1}・山本 泰彦^{*2}・大久保 孝昭^{*3}

要旨：本研究では、まずコンクリートのライフサイクルにおける環境負荷要因を検討した。廃棄物利用の環境便益を十分に表現するために、資源消費と廃棄物の排出の他、土地利用改変と森林 CO₂ 吸収能力の低減も環境負荷要因とした。次いで、ライフサイクルインパクトアセスメント(LCIA)に外部コストの概念を導入したコンクリートの環境性能の定量化手法を提案し、各種の原材料の外部コストのデータベースを構築した。さらに、所要の性能を確保しながら、環境性能を最良化するコンクリートの環境配慮型調合設計法を提案し、設計例について検討を行った。

キーワード：コンクリート, LCIA, 環境性能, 環境配慮型調合設計法, 外部コスト

1. はじめに

主要な建設材料であるコンクリートのライフサイクルにおいては、多くの自然資源とエネルギーが消費され、様々な汚染物が大気、水圏および土壌に排出される。このような資源やエネルギーの消費と廃棄物の排出は、地球・地域環境を害し、また、長期的には人の健康や生態系などにも多大な悪影響を与える。したがって、建設関連分野からの環境負荷(Environmental Burden, EB)の主な要因の一つと特定されているコンクリートの環境負荷を低減することは、持続可能な建設業を実現するための緊急な課題であると考えられる。

コンクリートにフライアッシュなどの産業廃棄物を用いることは古くから行われているが、この技術は廃棄物の有効利用という観点に立てば環境負荷低減を目指していると言える。また、近年は、従前より多量の廃棄物や多種多様なリサイクル材を使用することを目的とした研究が活発に行われており、コンクリートの用途によっては、その環境負荷性を強度や耐久性と同等なレベルで重要視しようとする動きもある。しかし、このような配慮によってコンクリートの調合を定めるための手法は未だ確立されていない¹⁾。

本研究はコンクリートの環境配慮型調合設計法の提案を目的としたものであり、まずコンクリートの環境負荷要因を検討し、コンクリートの環境性能の定量化と統合化を試みる。次いで、所要の施工性能、強度およ

び耐久性を確保すると同時に、環境性能を最良化する調合設計法を提案する。さらに、設計例として擁壁コンクリートの調合設計を行う。

2. 環境性能の評価法

環境性能の定量化は、環境配慮型材料設計・選択の基礎²⁾であるため、まず本節ではコンクリートの環境性能の統合・定量的評価法について述べる。

2.1 環境負荷要因

コンクリートのライフサイクルにおいては、石炭、石油、石灰石、粘土、骨材資源、石膏などの天然資源が消費される。また、これに伴って、各種の廃棄物が大気、水圏および土壌に排出される。エアエミッションは主に CO₂, SO_x, NO_x, CH₄, N₂O および煤塵(SPM)である。水圏汚染の程度は、通常は化学的酸素要求量(COD)、総リン量(T-P)および総窒素量(T-N)によって表される。土壌環境は固形廃棄物の埋立てによって汚染される。また、エネルギーの消費は、石炭、石油、天然ガスおよびウラン・鉱石の資源枯渇をもたらす。これらは、コンクリートの場合に考慮すべき環境負荷要因である。

セメント製造用原料(石灰石や粘土)、コンクリート用骨材などの原材料の採掘および廃コンクリートの埋立ては、動植物の生息環境の悪化と自然環境破壊をもたらす。このため、原材料の採取や廃棄物の埋立てによる土地利用改変およびこれに伴う自然環境破壊もコン

*1 山口大学 大学院理工学研究科感性デザイン工学専攻空間デザイン学講座助教授 博士(工学) (正会員)

*2 筑波大学 大学院システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻教授 Ph.D. 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建築構造学講座教授 工博 (正会員)

表-1 考慮したコンクリートの環境負荷要因および外部コスト

EB 要因 カテゴリ	気体汚染物						水圏への排出			枯渇性資源消費				生息地悪 化・減少
EB 要因	CO ₂ * (g)	SO _x (g)	NO _x (g)	CH ₄ (g)	N ₂ O (g)	煤塵 (g)	COD (g)	T-N (g)	T-P (g)	石油 (g)	石炭 (g)	天然ガス (g)	ウラン (g)	土地利用改 変(m ²)
外部コスト (円)	1.62 E-03	5.57 E-02	3.98 E-02	3.73 E-02	4.80 E-01	3.08 E-04	6.40 E-04	8.25 E-02	9.74 E-01	1.65 E-03	4.54 E-04	1.29 E-03	1.16 E-00	80**

[Notes] * 森林 CO₂ 吸収の減少量を材料製造や運輸などの過程における CO₂ の排出量に加算した

** 林地が採石場や最終処分場に転換されると仮定した場合の値

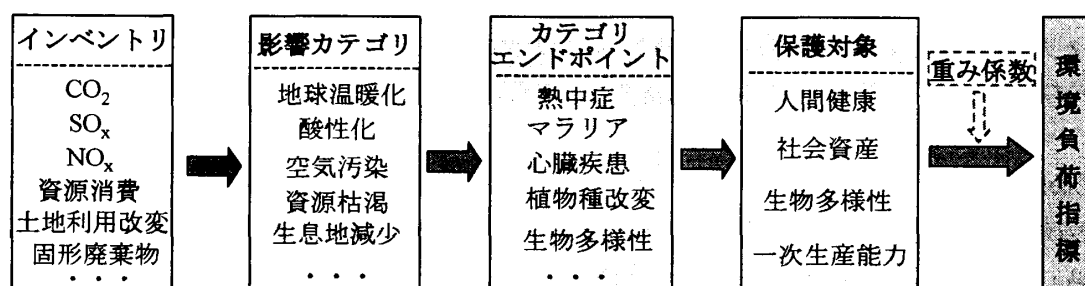


図-1 統合的なライフサイクルインパクトアセスメント (LCIA)

リートの環境負荷要因として取り上げる必要がある。

文献3)によれば、1tonの岩石や粘土の採取および1m³の固形廃棄物の埋立てを日本で行う場合の土地利用改変量は、それぞれ0.02m²および0.20m²程度である。一方、自然環境の破壊の程度を定量的に評価するために必要な情報は、現時点では乏しい。中野ら⁴⁾は、日本で採石および最終処分場建設が多く行われる比較的低い山地は広葉林地であり、広葉林のCO₂吸収能力は1.87kg-CO₂/m²・年であること、日本での採石および固形廃棄物の埋立てによる広葉林地面積の減少は、それぞれ1.9×10⁻⁵m²/tonおよび0.067m²/m³であること、森林破壊によるCO₂吸収不能の時間は、採石の場合に約80年、最終処分場の場合に40年程度であること等を示している。本研究では、これらの数値情報を利用するとともに、土地利用改変を独立の環境負荷要因として扱い、自然環境資源損失による環境負荷を森林CO₂吸収量の減少に単純化して評価する。

本研究で考慮した環境負荷要因を表-1の上段に示す。固形廃棄物は、この表では独立の要因となっていないが、その処分によるエネルギー消費、汚染物の排出、土地利用改変および森林CO₂吸収量の低減の形で考慮する。

2.2 環境性能指数

ライフサイクルにおけるエネルギー・資源の投入および廃棄物の排出は、環境ライフサイクルインベントリ

(LCI)によって評価できるが、これらの投入と排出による環境への影響を総合的に評価し、異なる条件の場合と比較検討できるために、本研究では、ライフサイクルインパクトアセスメント(LCIA)によってコンクリートの環境負荷または環境性能を定量化する方法⁵⁾を用いた。

LCIAとは、資源投入量と廃棄物排出量およびそれらが人の健康、社会資産、生物多様性、一次生産能力などの保護対象に与える影響を定量化した後、各保護対象のダメージに重み係数を適用して、環境への影響を一つの指標に統合する手法である(図-1)。また、本研究では、LCIAの結果から求まる1つの指標を環境性能指数(Environmental Performance Indicator, EPI)と呼称する。

(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構のLCAプロジェクト(1998-2002年)⁶⁾では、各環境負荷要因が各保護対象に与える影響を定量的に検討し、各保護対象の被害量を統合化するための被害量係数(上記の保護対象の重み係数)をコンジョイント分析によって求めている。また、同プロジェクトでは、LCIの結果に直接適用するだけで各環境負荷要因(表-1のEB要因)の環境への影響を統合的に評価可能な統合評価係数も構築した。

本研究のLCIAでは、上記プロジェクトで構築された後者の統合評価係数を使用する。ただし、環境負荷要因の統合化係数は、数値型と金銭型の2種がある。

表-2 コンクリート用原材料およびプロセスの外部コストの計算結果(一部)

投入と排出		高性能減水剤(kg)	水道水(kg)	陸砂(kg)	砕石(kg)	普通セメント(kg)	高炉B種セメント(kg)	B種フライアッシュセメント(kg)	高炉微粉末(kg)	フライアッシュ(II種, kg)	再生骨材(JIS I, kg)	輸送** (t・km)	練混ぜ (m³)	...
エアエミッション(g)	CO ₂	1.22	2.81E-01	1.87	5.68	8.56E+02	4.66E+02	-9.13	-9.13	-6.51E+01	-6.51E+01	7.83E+01	7.65E+03	...
	SO _x	1.58	2.31E-04	2.50E-03	7.09E-03	9.30E-02	6.18E-02	5.74E-02	5.74E-02	6.71E-03	6.71E-03	1.05E-01	9.01	...
	NO _x	2.73	3.15E-04	1.26E-02	2.94E-02	1.43	8.10E-01	-3.32E-01	-3.32E-01	-3.97E-01	-3.97E-01	1.19	3.55E+01	...
	CH ₄	9.41E-01	2.67E-04	2.30E-04	1.84E-03	1.34E-02	7.43E-03	5.00E-02	5.00E-02	-1.07E-02	-1.07E-02	2.41E-02	2.93	...
	N ₂ O	3.15E-01	1.96E-06	6.82E-05	1.71E-04	3.95E-03	1.97E-03	4.73E-04	4.73E-04	6.46E-05	6.46E-05	1.40E-03	2.08E-01	...
	SPM	1.96E-01	3.83E-05	5.62E-03	4.87E-03	3.89E-02	2.32E-02	-2.04E-03	-2.04E-03	-2.86E-03	-2.86E-03	9.65E-02	3.43E-02	...
水圏への排出(g)	COD	2.93	1.12E-04	1.06E-03	1.06E-03	2.14E-01	2.04E-01	-9.30E-02	-9.30E-02	-9.30E-02	-9.30E-02	3.60E-04	3.87	...
	T-N	2.55	9.31E-05	7.09E-04	7.23E-04	7.95E-02	7.65E-02	-1.07E-02	-1.07E-02	-1.13E-02	-1.13E-02	3.39E-04	5.77	...
	T-P	1.01E-02	1.03E-05	8.08E-05	8.27E-05	9.90E-02	9.50E-02	-1.21E-04	-1.21E-04	-2.00E-04	-2.00E-04	2.62E-05	3.04E-01	...
エネルギー資源(g)	Oil	53.20	1.31E-02	7.41E-01	1.18	18.57	11.45	2.99	2.99	2.45E-01	2.45E-01	21.90	1430	...
	Coal	50.10	2.83E-02	7.40E-03	1.61E-01	95.63	56.21	6.93	6.93	5.29E-01	5.29E-01	2.54E-03	271	...
	天然ガス	6.07	3.49E-03	8.10E-03	3.66E-05	4.50E-01	2.84E-01	8.40E-01	8.40E-01	6.67E-02	6.67E-02	3.38E-01	52.90	...
	ウラン	3.73	2.10E-03	5.50E-04	1.20E-02	4.22E-01	2.55E-01	5.15E-01	5.15E-01	3.92E-02	3.92E-02	1.89E-04	20.10	...
生息地減少(m²)	土地利用改変	8.20E-06	3.87E-09	2.09E-05	2.09E-05	-1.84E-05	-9.34E-05	-1.18E-04	-1.18E-04	-1.00E-04	-1.00E-04	2.56E-08	4.46E-04	...
外部コスト (円)		7.04	2.99E-03	6.94E-03	2.87E-02	2.12	1.22	1.71E+03	1.11	5.73E-01	-8.42E-02	2.19E-01	4.12E+01	...

[Notes] *ブレイン値：4000 cm²/g、** 10 tトラックによる輸送

本研究では、統合評価の結果は、環境負荷による社会的な損失の大きさを示す値であること、企業や自治体の環境会計に使用できることなどに配慮し、金銭型の統合評価係数を用い、それらを特に境負荷要因の外部コスト(External Cost Intensity)と呼ぶことにする。表-1に各環境負荷要因の外部コストの値を示す。

式(1)に示すように、LCIの結果である各環境負荷要因の数量にそれぞれの外部コストをかけて合算することによって、貨幣単位での環境性能指数(EPI)を合理的に算定できる。廃棄物をコンクリートに利用する場合は、廃棄物の焼却・埋立て等を行うこと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(EPI)に充分に反映するためには、式(1)に示すように、当該廃棄物の焼却・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ればよい。

$$EPI = \sum_i [(\sum_j E_{ij}^v - \sum_r E_{ir}^w) \times F_i] \quad (1)$$

ここに、 i ：環境負荷要因、 j ：バージン材または輸送などのプロセス、 r ：廃棄物またはリサイクル材、 F_i ：環境負荷要因 i の外部コスト、 E_{ij}^v ：バージン材またはプロセス j による環境負荷要因 i の量、 E_{ir}^w ：廃棄物 r を処理する場合の環境負荷要因 i の量

ス j による環境負荷要因 i の量、 E_{ir}^w ：廃棄物 r を処理する場合の環境負荷要因 i の量

コンクリート用原材料(リサイクル材を含む)とプロセス(輸送、練混ぜ等)の単位量あたりの外部コストを前もって式(1)によって算定・整備しておけば、コンクリートの環境性能指数は、式(2)によって簡便に求められる。式(1)と式(2)を用いた EPI の算出過程が異なるが、得られる結果は同じである。

$$EPI = \sum_m M_m \times S_m \quad (2)$$

ここに、 m ：コンクリートを製造するための原材料またはプロセス、 M ：原材料または費やされるプロセス m の量、 S_m ：原材料またはプロセス m の外部コスト

産業連関表分析法および式(1)または式(2)を用いた積み上げ法を併用して、表-1に示す14種の環境負荷要因を考慮した場合の、購入電力、燃料(軽油、重油、コークス等)、プロセス(材料輸送、廃棄物焼却、廃棄物埋立て、練混ぜ等)およびコンクリート用原材料の外部コストを求めた⁷⁾。表-2にコンクリート用原材料およびプロセスの外部コストの計算結果の一部を示す。

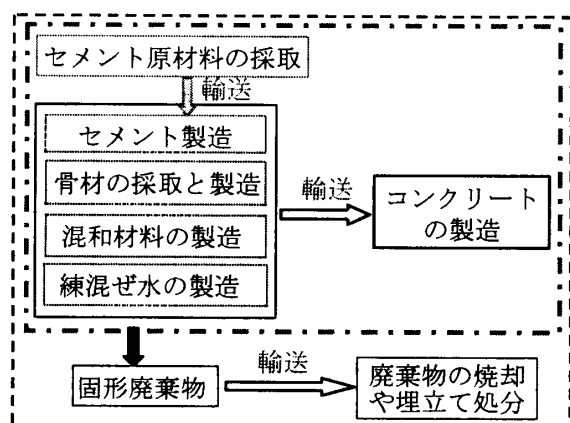


図-2 インベントリのシステム境界

3. 環境配慮型調合設計法

3.1 インベントリシステム境界

コンクリートの環境配慮型調合設計は、コンクリートの環境性能を最良化して、そのライフサイクルにおける環境負荷を小さくすることを目的としているため、エネルギーや資源の投入量および汚染物の排出量を見積るためのインベントリシステム境界は、一般には、コンクリートの一次原材料(粘土、石灰石、骨材など)の採取、二次原材料(セメント、碎石等)の製造、原材料の輸送、コンクリートの練混ぜ・輸送・施工、構造物の維持管理・解体・処分などを包含している必要がある。しかし、コンクリートの種類が相違しても、それらの輸送や廃棄処分による環境負荷には大差がないと考えられる。また、環境配慮型調合設計によって製造されるコンクリートであっても、そ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レベルに設定するのが基本であるので、その施工段階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。

上記の諸点を考慮し、本研究では、環境配慮型調合設計時に考慮する環境性能を算定するためのインベントリシステムの範囲を、図-2に示すように、原材料の採取からコンクリートの製造(練混ぜ)までの過程とした。これらの過程ではエネルギー・資源の消費および排出される固形廃棄物の処理による環境負荷を計上するが、輸送用車両の製造および工場の建設による環境負荷を考慮しない。

3.2 環境配慮型調合設計法

本研究で提案するコンクリートの環境配慮型調合設計法を図-3にフローの形で示す。

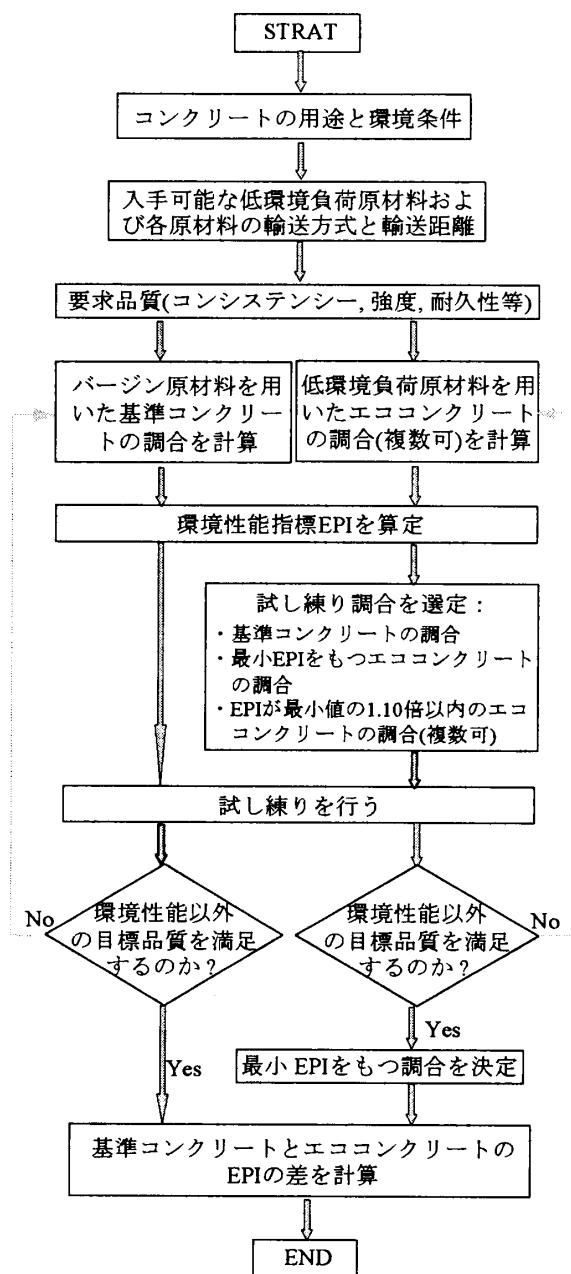


図-3 環境配慮型調合設計フロー

まず、コンクリートの要求品質を定めた後に、それらを満足するように、バージン原材料を用いたコンクリート(基準コンクリートと呼ぶ)の調合(N)を計算し、その環境性能指標 EPI を求める。また、基準コンクリートとほぼ同等な品質または性能を有し、環境負荷が小さい入手可能な原材料を用いたコンクリート(エココンクリートと呼ぶことにする)の複数について調合を計算し、それらの EPI をそれぞれ算定する。

次に、上記の計算結果を基に、エココンクリートの中から、EPI が最小となるものおよび EPI が最小 EPI より

表-3 コンクリートの要求品質

用途	使用場所	品質基準強度	計画供用期間の級	施工期間の予想平均気温の範囲	強度標準偏差	スランプ	空気量
擁壁用	東京	21 N/mm ²	標準	>20℃	2.5N/mm ²	8 cm	4.5%

り少し大きい範囲にあるものを選び、それらのエココンクリートと基準コンクリートの試し練りを行う。ここで、複数のエココンクリートを選ぶ理由に関しては、最初の計算で最小 EPI となる調合でも、試し練り後の調合補正によっては、その EPI が必ずしも最小とはならない可能性があるためである。なお、図-3 では、上記の「少し大きい」を最小 EPI の 1.10 倍以内と暫定的に表記しているが、この値については、コンクリート環境設計の経験や設計事例が蓄積されれば、自ら、必要な修正が施されていくものと思われる。

最後に、試し練りによって補正された調合が所要の性能を満たすことを確認し、この確認を終えた調合の中から最小 EPI をもつものを計画調合と決定するとともに、基準コンクリートの EPI との差を計算する。

4. 環境配慮型調合設計例

環境配慮型調合設計例として、擁壁コンクリートの調合設計を試みた。コンクリートの要求品質などを表-3 に示す。また、入手可能な原材料およびそれらの輸送距離を表-4 のように想定した。

表-4 の材料を用いる 6 シリーズのエココンクリートを考え、表-3 の要求品質を確保するためのエココンクリートおよび基準コンクリートの調合を日本建築学会発刊の調合設計指針に従って求めた。この計算結果を、表-5 の上から 7 番目までに示す。これらの 7 シリーズの調合に対して計算した環境性能指数を図-4 示す。

図-4 によれば、普通ポルトランドセメントの一部をフライアッシュまたは多量のスラグ微粉末で代替するシリーズ(FA20, FA30 および BG50)の場合は、EPI は基準シリーズ(N)より小さくなっていない。これは、調合設計指針がコンクリートの耐久性(例えば、中性化抵抗性)を確保するための水セメント比の最大値と単位セメント量の最小値を定めており、品質基準強度が低い場合は、混和材を使用しようとしても、ポルトランドセメントの使用量を基準調合より少なくすることができないためである。

表-4 入手可能な原材料の性質および輸送距離

練混ぜ水			上水道水
セ メ ン ト	普通ポルトランドセメント		$\rho = 3.15, D = 100$
	高炉セメント		B 種, $\rho = 3.04, D = 100$
	フライアッシュセメント		B 種, $\rho = 2.97, D = 100$
混 和 材 料	化学混和剤		AE 減水剤, $D = 200$
	混和材料	高炉スラグ微粉末	ブレン値: 4000 cm ² /g, $D = 150$
		フライアッシュ	II 種, $\rho = 2.20, D = 150$
骨 材	陸砂		$\rho = 2.60, F_m = 3.1, D = 30$
	碎石		$D_{max} = 25, \rho = 2.65, \rho_s = 1570, V_a = 60.4, F_m = 6.65, D = 30$
	再生粗骨材		JIS I 級, $D_{max} = 25, \rho = 2.32, \rho_s = 1420, V_a = 60.4, F_m = 6.56, D = 50$

[Notes] D: 10t ディゼールトラックの輸送距離(km)、 D_{max} : 最大寸法(mm)、 ρ : 絶対密度(g/cm³)、 ρ_s : 単位容積質量(kg/m³)、 V_a : 実積率(%), F_m : 粗粒率。

上記の是非はともかく、調合設計指針によった場合は、シリーズ BB の EPI が最も小さく(390 円/m³)、この最小 EPI は 2 番目に小さい EPI(シリーズ FB: 528 円/m³)より 10%以上小さい。したがって、シリーズ N と BB の調合を試し練りの対象として選定する。

選定した調合の試し練りによって、それらの調合を表-5 の下 2 行に示すもの(N*と BB*)のように調整したと想定する。調整したこれらの調合の EPI も図-4 に示したが、BB*の EPI は依然として最も小さい。したがって、エココンクリートの計画調合としては BB*の調合が採用されることになり、この調合の EPI は、N*より 41.2%低減される。

5. まとめ

本研究では、コンクリートの環境負荷要因について考察を加えるとともに、ライフサイクルインパクトアセスメントによるコンクリートの環境性能の定量化の方法を

表-5 入手可能な原材料を用いた調合の計算結果および試し練りによる調整

シリーズ	W/B (%)	s/a (%)	W (kg)	C (kg)	混和材の種類と使用量(kg)	砕石 (kg)	再生粗骨材 (kg)	陸砂 (kg)	AE 減水剤 (kg)
N	54.1	44.2	146	OPC, 270	0	1060	0	841	0.68
BB	52.6	44.8	142	BB, 270	0	719	308	833	0.68
FB	51.9	44.7	140	FB, 270	0	719	308	832	0.68
BG30	49.3	44.0	141	OPC, 200	BG, 86	719	308	808	0.71
BG50	34.8	40.9	139	OPC, 200	BG, 200	719	308	711	1.00
FA20	41.4	42.6	140	OPC, 270	FA, 68	719	308	763	0.81
FA30	38.0	41.8	137	OPC, 289	FA, 72	719	308	738	0.90
N*	54.8	44.1	148	OPC, 270	0	1060	0	836	0.68
BB*	53.0	44.7	143	BB, 270	0	719	308	830	0.68

[Notes] W: 単位水量、B: 単位結合材量、s/a: 細骨材率、C: 単位セメント量、OPC: 普通ポルトランドセメント、BB: B種高炉セメント、FB: B種フライアッシュセメント、BG: 高炉スラグ微粉末、FA: フライアッシュ、*: 試し練りによって調合が補正されたシリーズ

提案した。この方法により得られた環境性能指標は外部コストの形で表されるものである。また、環境負荷の最小化を目的とした環境配慮型調合設計法を提案し、具体的な設計例により提案手法の適用性を検証した。今後は、コンクリート構造物の維持管理中の環境負荷について詳細な検討を重ね、環境配慮型調合設計法をさらに発展させ、設計支援ツールを開発する予定である。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリートの環境負荷評価小委員会: コンクリートの環境負荷評価委員会報告, コンクリート工学, Vol.40, No.12, pp.10-16, 2002.12.
- 2) Z. Li, Y. Yamamoto and T. Ohkubo: Environment-conscious design of alkali-aggregate reaction control in concrete, *Proc. of 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete* (China), pp.592-600, 2004.10.
- 3) 安部和子ほか: 土地利用による生物多様性の影響評価, 2nd 日本版日本被害算定型影響評価ワークショップ講演集, pp.13-30, 2002.7.
- 4) 中野加都子ほか: 廃アスファルトコンクリートの再資源化による環境インパクト低減化の評価, 土木学会論文集, No.559, VII-2, pp.81-89, 1997.2.
- 5) Z. Li, Y. Yamamoto and T. Ohkubo: Evaluation of environmental performance of concrete based on social

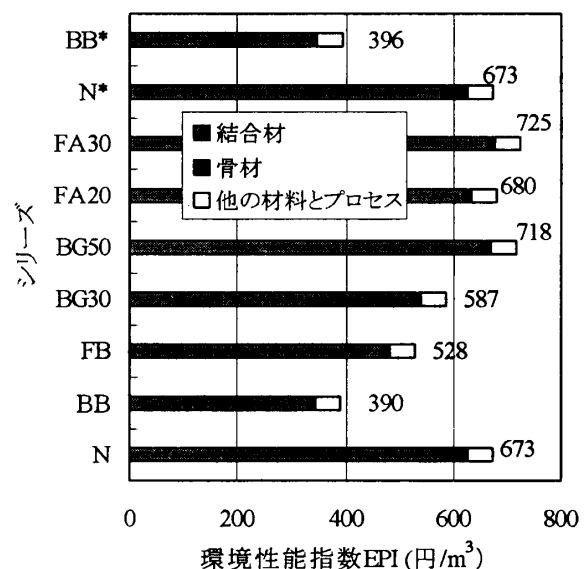


図-4 各シリーズのコンクリートの環境性能指数

- cost, *Proceedings of RILEM International Symposium on Environment-Conscious Materials and Systems for Sustainable Development* (Japan), pp.43-50, 2004.9.
- 6) 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.
- 7) Z. Li, Y. Yamamoto and T. Ohkubo: Design and evaluation of sustainable concrete production, *Proc. of 6th international congress on global construction: ultimate concrete opportunities - Achieving Sustainability in Construction* (Scotland), pp. 99-107, 2005.7.