

コンクリート構造物のサステナビリティ指標の要因分析

Factor analysis of sustainable indicator in concrete structure

北海道大学大学院 工学院 ○学生員 後藤隼一郎 (Shunichiro Goto)
 北海道大学大学院 工学研究院 フェロー 横田弘 (Hiroshi Yokota)
 北海道大学大学院 工学研究院 正会員 橋本勝文 (Katsufumi Hashimoto)
 日本サステナビリティ研究所 フェロー 堺孝司 (Koji Sakai)

1. はじめに

我が国では 2020 年度の温室効果ガス排出削減目標として 2005 年度比で 3.8% 減とすることを目標に各分野で様々な対策がなされている¹⁾。建設分野における CO₂ 排出量は、全体の約 3 割とされており、この影響を無視してその活動を行うことができないことは明らかである²⁾。また、建設資材として最も多く用いられているのがコンクリートであり、セメント製造の際、多くの CO₂ を排出するという特徴がある。

現行の土木学会コンクリート標準示方書では、構造計画においては、コンクリート構造物が自然や社会等の環境に与える影響を考慮しなければならないとしている³⁾。ところが、環境性に対する要求性能は存在しておらず、環境負荷削減の明確な位置付けはなされていない。

一方、安全性に対しては、要求性能を設定し、設計した断面および構造が要求性能を満足するかどうかの照査が行われる。例えば、設計における断面耐力は式(1)を用いて照査される³⁾。

$$\gamma_i S_d \leq R_d \quad (1)$$

ここで、

S_d : 設計断面力または設計限界値, R_d : 設計断面耐力または設計応答値, γ_i : 構造物係数

構造物係数は一般に 1.0 とされており、1.0 以上の値に関する議論はほとんどされていない。これは、構造物係数が 1.0 であれば、最低限の安全性が満たされており、経済性を考慮することが優先されてきたからである。そのため、最終的な安全性の照査において、構造物係数を 1.0 以上とすることで付与される安全性の余裕度には、配慮されてこなかったといえる。

2011 年に起きた東日本大震災は、社会基盤のサステナビリティの問題の本質を再考する機会を与えた。想定外の荷重が構造物に作用する可能性が明らかとなり、安全性の余裕度をどの程度確保すればよいかということが新たな課題となった。一般に安全性の余裕度を大きくすると、費用や環境負荷を増大させる。これは、安全性の余裕度で言い換えられるサステナビリティの社会的側面と経済側面や環境側面の間の衝突である。したがって、本質的には費用や環境負荷に安全性の余裕度がどう影響するかについて検討した上で、最終的な安全性の余裕度の決定を行うべきである。そのため本研究では、最も単純なケースとして RC 梁の曲げとせん断を対象に、安全性の余裕度と、CO₂ 排出量および費用との関係について、定量化し、その要因を分析することを目的とした。

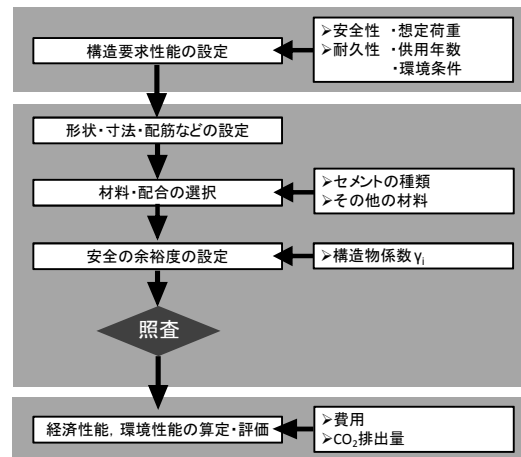


図-1 サステナビリティ評価手順

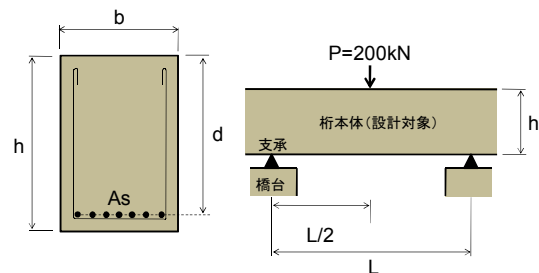


図-2 対象とした RC 梁

表-1 各 RC 梁の水準

Cases	C ₀ (kg/m ³)	L(m)	d(m)	b(m)	h(m)
1-1	1.5	5	0.46	0.35	0.5
1-2	1.5	10	0.56	0.45	0.6
1-3	1.5	15	0.71	0.5	0.75
1-4	1.5	20	0.71	0.6	0.75
2-1	4.5	5	h-C _{min}	0.35	0.5
2-2	4.5	10	h-C _{min}	0.45	0.6
2-3	4.5	15	h-C _{min}	0.5	0.75
2-4	4.5	20	h-C _{min}	0.6	0.75

2. サステナビリティの評価方法

2.1 概要

図-1 に本研究で用いたサステナビリティの評価手順を示す。以下に、設計の詳細を説明する。

2.2 構造形式および環境条件

図-2 に対象とした RC 梁の概要を示す。本研究では、

表-2 コンクリート配合の詳細

配合名	セメントの種類	圧縮強度 (N/mm ²)	W/C	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad
OPC50	普通ポルトランドセメント	30	0.48	157	328	783	1071	0.82
OPC40	普通ポルトランドセメント	40	0.395	162	411	688	1081	1.03
BB50	高炉セメントB種	30	0.47	156	332	764	1076	0.83
BB40	高炉セメントB種	40	0.385	161	419	672	1081	1.05
FA50	フライアッシュセメントA種	30	0.515	149	290	840	1065	2.9
FA40	フライアッシュセメントA種	40	0.41	155	379	735	1081	3.79

断面寸法 (d : 有効高さ, b : 幅, h : 高さ) とスパン (L), 使用環境としてのコンクリート表面塩化物イオン濃度 (C_0) を変化させた 6 水準について評価した。表-1 に各 RC 梁の水準を示す。荷重はスパン中央に集中荷重 200kN を作用させた。環境条件として, Case1 は塩化物イオンが飛来しない通常の屋外の環境状況を想定し, C_0 を 1.5 kg/m³ とした。一方, Case2 は鋼材の腐食が生じやすい環境を想定し, C_0 を 4.5 kg/m³ とした。また, 供用年数は全ての Case において 50 年を想定した。これに伴って, 算出した最小かぶりを元に, 有効高さを変化させた。有効高さは式(2)で算出した。

$$d = h - c_{\min} \quad (2)$$

ここで,

$c_{\min}$: 耐久性の照査を満たす最小かぶり

Case1 におけるかぶりは, コンクリート標準示方書で定められた最小のかぶり 40mm とした。Case2 におけるかぶりは, 耐久性の照査式(3)にて材料や鉄筋量によって異なる耐久性の照査を満たす最小のかぶりを算出した。

$$\gamma_i \frac{C_d}{C_{\lim}} \leq 1.0 \quad (3)$$

ここで,

C_d : 鋼材位置における塩化物イオン濃度設計値, $C_{\lim}$: 鋼材腐食発生限界濃度

2.3 配合

表-2 に, 検討したコンクリートの配合を示す。これは, 一般に使用されているレディミクストコンクリートの配合を元に設定したものである。セメントは普通ポルトランドセメント, 高炉セメント B 種, フライアッシュセメント A 種の 3 種類とし, それぞれにおいて W/C が約 50%, 40% の 2 水準を検討した。なお, 圧縮強度の特性値はレディミクストコンクリートにおける呼び強度を用いた。

2.4 曲げとせん断に対する安全性の照査⁴⁾

曲げ断面力の計算式を式(4), 曲げ断面耐力の計算式を式(5), せん断断面力の計算式を式(6), せん断断面耐力の計算式を式(7)に示す。曲げとせん断に対する照査式をそれぞれ式(8)および式(9)に示す。

式(8)および式(9)に用いられる γ_i を増加させれば, 断面耐力が増加し, その結果, 安全性の余裕度が大きい断面が設計されることになる。以後, 構造物係数による安全性の余裕度を「余裕度」と表現する。本研究では余裕度を 1.0~1.5 の範囲で変化させ, これが CO₂ 排出量およ

び費用に与える影響を考察する。その際, 式(8)および式(9)を満たす最小の引張鉄筋比 p , せん断補強鉄筋比 p_w をそれぞれ算出した。必要鉄筋量の計算式を式(10), 必要コンクリート体積の計算式を式(11)に示す。

$$M = \frac{PL}{4} \quad (4)$$

$$M_u = bd^2 \cdot pf_y \left(1 - 0.59 \cdot \frac{pf_y}{f'_c}\right) \quad (5)$$

$$V = \frac{P}{2} \quad (6)$$

$$V_{yd} = \frac{\sqrt[3]{d} \cdot 0.23 \sqrt{f'_c} \cdot \sqrt[3]{100p} \cdot b \cdot d}{1.3} + \frac{p_w \cdot b \cdot f_y (\sin \alpha + \cos \alpha) \cdot d}{1.15 \cdot 1.1} \quad (7)$$

$$\gamma_i \frac{M}{M_u} \leq 1 \quad (8)$$

$$\gamma_i \frac{V}{V_{yd}} \leq 1 \quad (9)$$

$$W_s = p \cdot b \cdot d \cdot L \cdot \rho_s + p_w \cdot b \cdot s \cdot e \cdot g \cdot \rho_s \quad (10)$$

$$C_c = b \cdot h \cdot L - \frac{W_s}{\rho_s} \quad (11)$$

ここで,

p : 引張鉄筋比, f_y : 鉄筋の引張強度, f'_c : コンクリートの圧縮強度の設計値, p_w : せん断鉄筋比, α : せん断補強鉄筋が部材軸となす角, γ_i : 構造物係数(1.0~1.5), s : せん断鉄筋の配置間隔, W_s : 必要鉄筋量, ρ_s : 鉄筋密度, C_c : 必要コンクリート体積, e : せん断補強鉄筋本数, g : せん断補強鉄筋長さ

2.5 環境側面への影響評価

CO₂ 排出量についてインベントリ分析を行った。インベントリ分析では, 既存の土木学会指針に基づくデータを使用した⁵⁾。表-3 に使用した構成材料の CO₂ 排出量原単位を示す。このデータと余裕度によって異なる材料量を勘案して, CO₂ 排出量を算出した。

2.6 経済側面への影響評価

経済側面としては, 梁を建造するのに必要な材料コストの合計(以下, 「価格」とする)を算出した。表-4 にレディミクストコンクリートの単価を, また表-5 に鉄筋の単価を示す⁶⁾。これらの単価データは 2015 年 8 月の札幌市におけるものである。余裕度によって必要となる鉄筋量およびコンクリート体積が異なるので, それらにそれぞれの単価を乗じて合算することで, 価格を算出した。

3. 各要因がサステナビリティ評価に及ぼす影響

3.1 スパンによる影響

Case1-1～Case1-4における余裕度を 1.0～1.5 の範囲で変化させたときの CO₂ 排出量および価格の変化率を図-3 に示す。同図では、スパン（構造物の規模）による影響のみを検討するため、コンクリートの配合は OPC50 を用いた結果のみを示している。

余裕度の増加が CO₂ 排出量および価格に与える影響は Case1-1 (L=5m) が最も影響が大きく、余裕度を 1.1 にとれば、CO₂ 排出量は 2.3%、価格は 3.4%増加した。余裕度を 1.5 にとれば、CO₂ 排出量は 12.1%、価格は 17.8%増加した。一方、Case1-3 (L=15m) の場合、余裕度の増加が CO₂ 排出量および価格に与える影響は最も小さく、余裕度を 1.1 にとれば、CO₂ 排出量は 1.5%、価格は 2.7%増加した。余裕度を 1.5 にとれば、CO₂ 排出量は 7.9%、価格は 13.7%増加するにとどまった。

仮に余裕度を大きくすることに伴う CO₂ 排出量の増加を 10%程度許容できると考えると、余裕度の増加が CO₂ 排出量に与える影響の最も大きかった Case1-1 においては余裕度を 1.4 に、その影響の最も小さかった Case1-3 においては、余裕度を 1.5 に設定できることがわかる。また、余裕度を大きくすることに伴う価格の増加を 10%程度許容できると考えると、余裕度の増加が価格に与える影響の最も大きかった Case1-1 においては余裕度を 1.3 に、その影響の最も小さかった Case1-3 においては余裕度を 1.4 に設定できることがわかる。

以上のことから余裕度を設定する際に、スパン（あるいは、構造物の大きさや部材寸法）による影響を考慮す

べきであると言える。

3.2 セメントの種類による影響

Case1-2 における各配合の余裕度を 1.0～1.5 の範囲で変化させたときの CO₂ 排出量および価格の変化率を図-4 に示す。

表-3 構成材料の CO₂ 排出量原単位

材料	CO ₂ (kg-CO ₂ /t)
普通ポルトランドセメント	766.6
高炉セメントB種	458.7
フライアッシュA種	624
粗骨材	2.9
細骨材	3.7
化学混和剤(リグニン系)	123
電気炉鋼	767.4

表-4 レディミクストコンクリート単価

配合名	単価(円/m ³)
OPC50	13300
OPC40	14750
BB50	13500
BB40	15150
FA50	13300
FA40	14750

表-5 鉄筋の諸元

規格	引張強度(N/mm ²)	単価(円/kg)
SD345	345	65

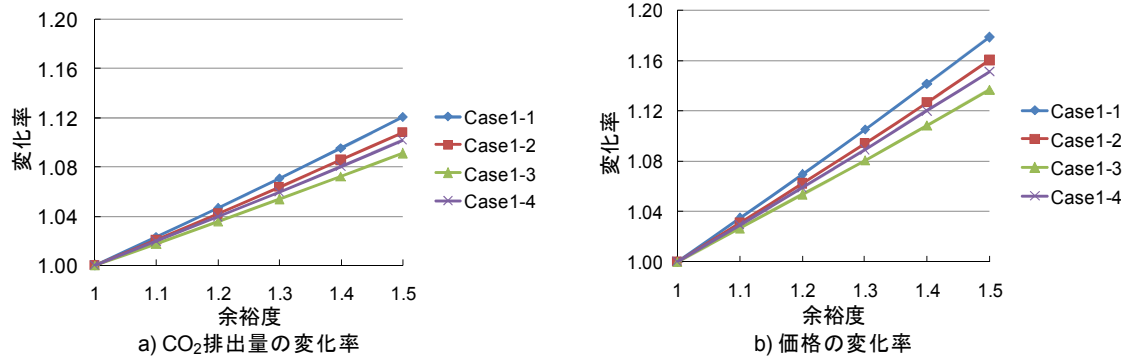


図-3 OPC50 を用いた各 Case の CO₂ 排出量および価格変化率の比較

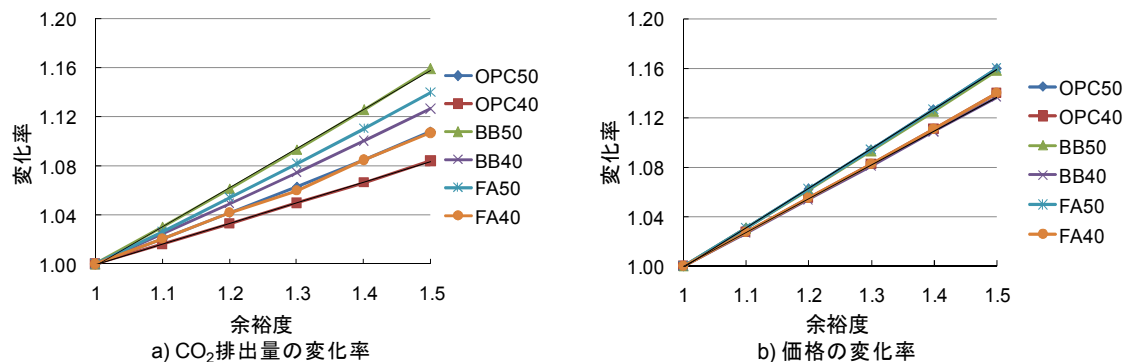
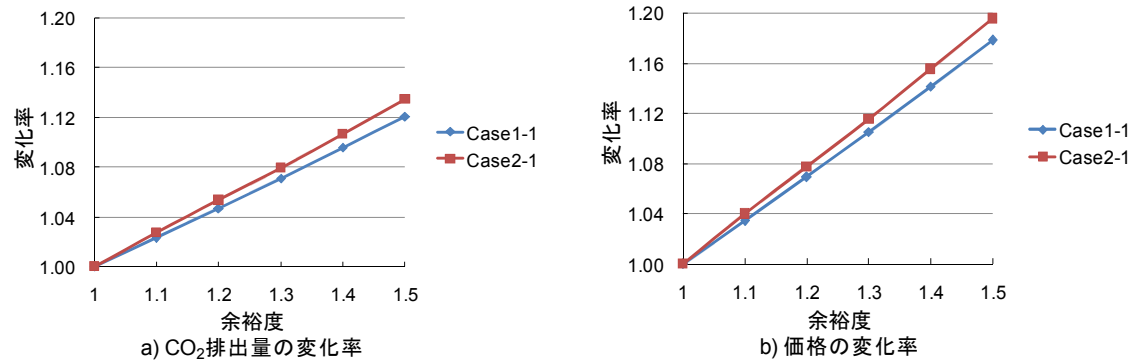


図-4 Case1-2 における各配合の CO₂ 排出量および価格変化率の比較

図-5 OPC50を用いた Case1 と Case2 の CO₂ 排出量および価格変化率の比較

余裕度の増加が CO₂ 排出量に与える影響は BB50 を用いた場合が最も大きく、余裕度を 1.1 にとれば、CO₂ 排出量は 3.0%、余裕度を 1.5 にとれば、CO₂ 排出量は 16%増加した。一方、OPC40 を用いた場合の影響が最も小さく、余裕度を 1.1 にとれば、CO₂ 排出量は 1.6%、余裕度を 1.5 にとれば、CO₂ 排出量は 8.4%増加するにとどまった。また、余裕度の増加が価格に与える影響は OPC50 および FA50 を用いた場合が最も大きく、余裕度を 1.1 にとれば、価格は 3.1%、余裕度を 1.5 にとれば、価格は 15.9%増加した。一方、BB40 を用いた場合、余裕度の増加が価格に与える影響は最も小さく、余裕度を 1.1 にとれば、価格は 2.7%、余裕度を 1.5 にとれば、価格は 14.0%増加するにとどまった。

仮に、余裕度を大きくすることに伴う CO₂ 排出量の増加を 10%程度許容できるとすると、余裕度の増加が CO₂ 排出量に与える影響の最も大きかった BB50 を用いた場合においては余裕度を 1.3 に、その影響が最も小さかった OPC40 を用いた場合においては余裕度を 1.5 に設定できることがわかる。また、余裕度を大きくすることに伴う価格の増加を 10%程度許容できるとすると、余裕度の増加が価格に与える影響の最も大きかった BB40 を用いた場合においては余裕度を 1.25 程度に、その影響の最も小さい OPC50 および FA50 を用いた場合においては余裕度を 1.3 に設定できることがわかる。

以上のことから、余裕度を設定する際に、セメントの種類による影響も受けることがわかる。

3.3 有効高さ（かぶり）による影響

Case1-1 および Case2-1 において、余裕度を 1.0~1.5 の範囲で変化させたときの CO₂ 排出量および価格の変化率を図-5 に示す。有効高さ（かぶり厚さ）による影響（耐久性に関わる影響）を検討するため、コンクリートの配合は OPC50 を用いた結果のみを示す。

Case1-1 と Case2-1 を比べると、Case2-1 の方が余裕度の増加が CO₂ 排出量および価格に与える影響は大きく、余裕度を 1.1 にとれば、CO₂ 排出量は 2.8%、価格は 4.0%増加した。余裕度を 1.5 にとれば、CO₂ 排出量は 13.5%、価格は 19.6%増加した。一方 Case1-1 では、余裕度を 1.1 にとれば、CO₂ 排出量は 2.3%、価格は 3.4%増加した。余裕度を 1.5 にすると、CO₂ 排出量は 12.1%、価格は 17.8%増加するにとどまった。

仮に、余裕度を大きくすることに伴う CO₂ 排出量の

増加を 10%許容できるとすると、余裕度の増加が CO₂ 排出量に与える影響の大きかった Case2-1 においては余裕度を 1.35 程度に、その影響が小さかった Case1-1 においては余裕度を 1.4 に設定できることがわかる。また、余裕度を大きくすることに伴う価格の増加を 10%程度許容できるとすると、余裕度の増加が価格に与える影響の大きかった Case2-1 においては余裕度を 1.25 程度に、その影響が小さかった Case1-1 においては余裕度を 1.3 に設定できることがわかる。

以上のことから、余裕度を設定する際に、有効高さ（かぶり厚さ）の影響を受けることもわかった。

4. まとめ

本研究では、スパン、セメントの種類、および有効高さが余裕度（構造物係数）の増加に伴う CO₂ 排出量および価格に及ぼす影響について検討した。本研究の主な結果をまとめると以下のとおりである。

1. 余裕度の設定においてはスパン、セメントの種類、および有効高さによる影響を受け、その影響の程度を定量的に示した。
2. 余裕度の増加に伴う価格の増加を 10%程度許容できるとすると、余裕度は 1.25~1.40 に設定できる。
3. 余裕度の増加に伴う CO₂ 排出量の増加を 10%程度許容できるとすると、余裕度は 1.35~1.50 に設定できる。

以上の結果を踏まえ、今後 RC 構造物の設計においては、サステナビリティの観点から安全性の余裕度および各指標間のバランスを考える必要があると言える。今後詳細な検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 環境省：環境白書, 2015.
- 2) 鹿島建設：鹿島環境報告書, 2003.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕, 2012.
- 4) 吉川弘道：鉄筋コンクリートの設計 限界状態設計法と許容応力度設計法, 丸善出版（株）, 1997.
- 5) 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 号, 2005.
- 6) 建設物価調査会：建設物価, 2015 年 8 月.