

# 論文 LCC および LCCO<sub>2</sub> を考慮した RC 栈橋の最適なかぶりと呼び強度に関する一考察

伊澤 允智<sup>\*1</sup>・山形 麻弓<sup>\*2</sup>・関 博<sup>\*3</sup>

**要旨**：世界的に温暖化ガス削減の動きが強まっており、コストの観点に加え環境影響も考慮した上で構造物の設計や維持管理計画を決定する必要がある。本研究では温暖化ガスの中で CO<sub>2</sub> に着目し、RC 構造物のライフサイクルにおける総 CO<sub>2</sub> 排出量（以下、LCCO<sub>2</sub>）とコスト（以下、LCC）の双方を総合的に評価する手法に関して検討した。さらに、RC 栈橋に対してかぶりと呼び強度を要因とした計算を実施し、これらの最適値に関して考察を加えた。

**キーワード**：LCC, LCCO<sub>2</sub>, 統合化手法, 現在価値換算

## 1. はじめに

建設投資の動向と社会基盤施設における維持管理の重要性を考えると、社会基盤施設の合理的なコスト管理が今日的課題と考えられ、初期建設費のみに着目するのではなく、LCC で構造物の経済性を評価する必要がある。

一方、2005 年 2 月の京都議定書の発効によって世界的に温暖化ガス削減の動きが強まっており、コストの観点に加え環境影響も考慮した上で構造物の設計や維持管理を実施するべきと考えられる。

本研究では温暖化ガスの中で比較的数値の整っている CO<sub>2</sub> に着目し、RC 構造物のライフサイクルにおける総 CO<sub>2</sub> 排出量(以下、LCCO<sub>2</sub>)とコスト(以下、LCC)の双方を総合的に評価する手法に関して検討した。さらに、RC 栈橋の上部工を対象として鉄筋のかぶりとコンクリートの呼び強度を要因として選び、LCCO<sub>2</sub> および LCC の計算を実施し、これらの最適値に関して考察を加えた。

## 2. LCC および LCCO<sub>2</sub> の算定式

RC 構造物のライフサイクルにおける各段階の値を統合することにより、次式によって LCC、

LCCO<sub>2</sub> を算定した。なお、本文では劣化後のある時点で建替を行うこととした。

$$LCCO_2 = CO_{2i} + CO_{2rep} \times n + CO_{2rd} \quad (1)$$

ここに、CO<sub>2i</sub>：初期 CO<sub>2</sub> 排出量、CO<sub>2rep</sub>：建替 CO<sub>2</sub> 排出量、CO<sub>2rd</sub>：撤去 CO<sub>2</sub> 排出量、n：建替回数

$$LCC = C_i + C_{rep} \left( \frac{1+h}{1+i} \right)^{t_i} + C_{rd} \left( \frac{1+h}{1+i} \right)^{t_{rd}} \quad (2)$$

ここに、C<sub>i</sub>：初期コスト、C<sub>rep</sub>：建替コスト、C<sub>rd</sub>：撤去コスト、i：資本の利率、h：物価上昇率、t<sub>i</sub>：建替年数、t<sub>rd</sub>：撤去年数

## 3. LCC および LCCO<sub>2</sub> の統合化手法

コストと環境影響を総合的に評価する手法として、環境効率指標を用いる方法、国土交通省の「総合評価落札方式」の考えを応用した方法、環境税により環境影響をコスト化する方法などが考えられる。

### 3.1 環境効率指標を考慮した方法

持続可能な社会を実現するために資源・エネルギーの使用を効率化するとともに、経済活動の単位あたりの環境負荷を低減させる必要があり、その指標となるのが環境効率である。環境効率は次式で表される。

\*1 早稲田大学大学院 建設工学専攻 (正会員)

\*2 早稲田大学大学院 建設工学専攻

\*3 早稲田大学 理工学部社会環境工学科教授 工博 (正会員)

$$\text{環境効率} = \text{付加価値} / \text{環境負荷} \quad (3)$$

建設企業では、付加価値として総売上量や施工高を採用している<sup>1)</sup>。本研究においては付加価値をLCC算定値で、環境負荷をLCCO<sub>2</sub>算定値で置き換えて考えることにした。

### 3.2 総合評価落札方式を考慮した方法

建設分野においてコスト概念とそれ以外の性能を考慮できる評価形式としては、総合評価落札方式がある。基本的な評価方法は、技術提案として入札者から提示された性能等の「価格以外の要素」を得点として評価し、性能等の向上に応じた必要コストを考慮し、得点とコストの比（以下、評価値）を用いて提案の優劣を評価するものであり、式(4)で示される<sup>1)</sup>。

$$\text{評価値} = \text{得点} / \text{コスト} \quad (4)$$

LCCとLCCO<sub>2</sub>が小さいほど評価は高いとの考えから、本研究では得点がLCCとLCCO<sub>2</sub>の逆数で評価できると仮定し、式(5)で評価値を算定することとした。

$$\text{評価値} = \frac{1}{\text{LCC} \cdot \text{LCCO}_2 \cdot \text{初期コスト}} \quad (5)$$

### 3.3 環境税を考慮した方法

環境省から出されている環境税として2400円/炭素トンが提案されている<sup>2)</sup>。今回、この値を用いて環境税により二酸化炭素排出量をコスト化することを試み、LCCとLCCO<sub>2</sub>の統合化は次式で表されるものとした。

$$\text{合成}COST = \text{LCC}(\text{円}) + \text{LCCO}_2(\text{t} \cdot \text{CO}_2) \times 655(\text{円}/\text{t} \cdot \text{CO}_2) \quad (6)$$

## 4 RC 栈橋におけるケーススタディ

### 4.1 対象構造物

千葉県某港におけるRC栈橋上部工を対象構造物とした。概略図を図-1に示す。

栈橋のライフサイクルは式(2)に示したように構成材料の製造を含めた施工段階、建替を行う供用段階、供用期間終了後の撤去（解体、廃棄）段階を考えた。なお、栈橋劣化予測により建替の時期を設定することとした。

また、LCC算定では現価係数が大きく影響す

ると考えられるが、本研究では統合化手法の検討を主な目的にしたため、今回は*i*=3%、*h*=1%として計算を実施した。

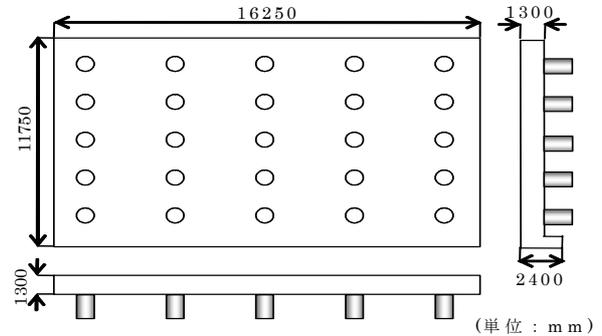


図-1 対象構造物の概略図

### 4.2 劣化予測パラメータとコンクリート要因

表-1のパラメータを基に、かぶりと呼び強度に対して建替年数を算定した。また、各呼び強度における配合表を表-2に示す。なお、劣化モデルは伊庭らの研究<sup>3)</sup>により内部鉄筋の腐食進行で表されるものとした。

表-1 劣化予測パラメータ<sup>3), 4)</sup>

項目	数値	
設計かぶり	7~12[cm]	
呼び強度	21,24,27,30,33,36[N/mm <sup>2</sup> ]	
表面塩化物イオン量	13.0[kg/m <sup>3</sup> ]	
限界塩化物イオン量	1.2[kg/m <sup>3</sup> ]	
鉄筋径	13[mm]	
拡散係数D <sub>p</sub>	logD <sub>p</sub> = -3.0(W/C) <sup>2</sup> + 5.4(W/C) - 2.2 *W/C:水セメント比	
かぶりの施工誤差	平均値	0.35[cm]
	標準偏差	0.52[cm]
	分布形状	対数正規
ひび割れ発生前の腐食速度	平均値	1.2[mg/cm <sup>2</sup> /year]
	標準偏差	0.6[mg/cm <sup>2</sup> /year]
	分布形状	対数正規
ひび割れ発生後の腐食速度	平均値	12.4[mg/cm <sup>2</sup> /year]
	標準偏差	6.2[mg/cm <sup>2</sup> /year]
	分布形状	対数正規
建替条件	鉄筋断面積10%減少	

表-2 コンクリート配合

呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	セメント (kg/m <sup>3</sup> )	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	AE減水剤 (l/m <sup>3</sup> )	価格 (円/m <sup>3</sup> )	CO <sub>2</sub> (kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
21	263	165	863	1012	3.94	10300	126.8
24	286	163	842	1021	4.29	10650	137.3
27	306	163	823	1021	4.59	11050	146.4
30	338	165	784	1029	5.07	11400	160.9
33	359	165	765	1029	5.38	11800	170.5
36	391	167	715	1045	5.86	12350	185.0

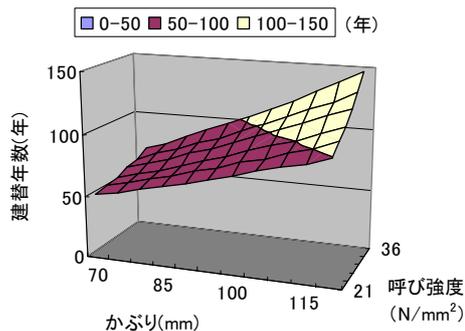


図-2 建替年数の算定図

図-2 に建替年数の算定図を示す。本図から、供用期間 100 年で建替えが 1 回必要となるかぶり 70mm~90mm, 呼び強度 21N/mm<sup>2</sup>~36 N/mm<sup>2</sup> を検討範囲とした。

### 4.3 インベントリー分析

初期建設段階と解体・撤去段階のフローは文献 5 を参考として図-3, 図-4 と考え、またインベントリー結果を表-3 に示した。ここで、建替段階は解体・撤去と建設が行われるものとし、両段階を足し合わせることで建替段階のインベントリー結果は得られるものとした。

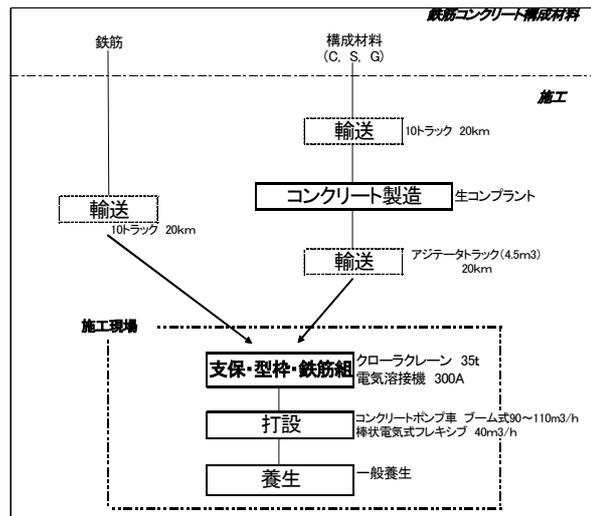


図-3 初期建設段階工事フロー<sup>1)</sup>

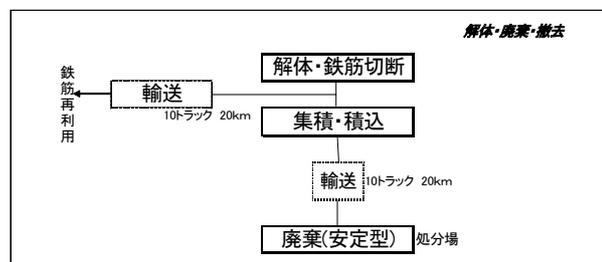


図-4 解体・撤去段階工事フロー<sup>1)</sup>

表-3 インベントリー分析結果

工程	材料・使用機械等	数量		原単位		総CO <sub>2</sub> 排出量 (CO <sub>2</sub> -kg)	コスト (円)	
		単位	量	CO <sub>2</sub> 排出量 <sup>5)</sup> 単位	量			
構成材料	コンクリート	t,m <sup>3</sup>	*1	kg-CO <sub>2</sub> /t	*4	*5	*6	
	鉄筋	kg	7900	kg-CO <sub>2</sub> /kg	0.767	6060	494000	
施工	生コン製造	t,m <sup>3</sup>	*1	kg-CO <sub>2</sub> /t	7.68	*5	*7	
	運搬	アジテータトラック(4.4-4.5m <sup>3</sup> )	km・m <sup>3</sup>	*2	kg-CO <sub>2</sub> /km・m <sup>3</sup>			0.253
	打設	コンクリートポンプ車 boom式90~110m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup>	*1	kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>			0.330
		棒状電気式フレキシブ 40m <sup>3</sup> /h	h	*3	kg-CO <sub>2</sub> /h	0.240		
	支保工	一般養生	h	310	kg-CO <sub>2</sub> /h	0	0	*8
		クローラークレーン35t	l(軽油量)	239	kg-CO <sub>2</sub> /l	2.82	675	
		溶接機手動300A	l(軽油量)	142	kg-CO <sub>2</sub> /l	2.82	401	
		クローラークレーン35t	l(軽油量)	8.19	kg-CO <sub>2</sub> /l	2.82	23.1	
型枠工		クローラークレーン35t	l(軽油量)	435	kg-CO <sub>2</sub> /l	2.82	1230	
鉄筋運搬加工組立	ディーゼル10tトラック(距離:20km)	km・t	158	kg-CO <sub>2</sub> /km・t	0.122	19.3	*9	
	クローラークレーン35t	l(軽油量)	55.3	kg-CO <sub>2</sub> /l	2.82	156		
解体	栈橋解体	RC地上から解体	m <sup>3</sup>	*1	kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	15.6	*5	*9
		溶接機(鉄筋切断)			kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	0.700		
		コンクリート集積			kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	7.90		
	コンクリートガラ運搬	ディーゼル10tトラック(距離:20km)	km・t	*2	kg-CO <sub>2</sub> /km・t	0.122		
	コンクリートガラ処理	安定処理	t	*1	kg-CO <sub>2</sub> /t	1.64		
鉄筋運搬	ディーゼル10tトラック(距離:20km)	km・t	158	kg-CO <sub>2</sub> /km・t	0.122	19.3	*10	

\*1 次式で求まるものとする

$$\text{コンクリート使用量(m}^3\text{)} = 251.82 - 522.45dx + 126.68dx^2 - 8.16dx^3$$

ここでdxはかぶり120mmを基準としたときの变化量(m)

またコンクリートの比重は2.3とした

\*2 \*1の使用量×20

\*3 \*1の使用量÷40

\*4 使用する呼び強度に依存し、表-2の値を用いる

\*5 数量×原単位

(コンクリート体積)×(表-2の価格)

\*7 構成材料「コンクリート」のコストに含まれる

(コンクリート体積)×2500(円/m<sup>3</sup>)

\*8 (コンクリート体積)×13000(円/m<sup>3</sup>)+(コンクリート重量)×1500(円/t)

\*9 考慮せず

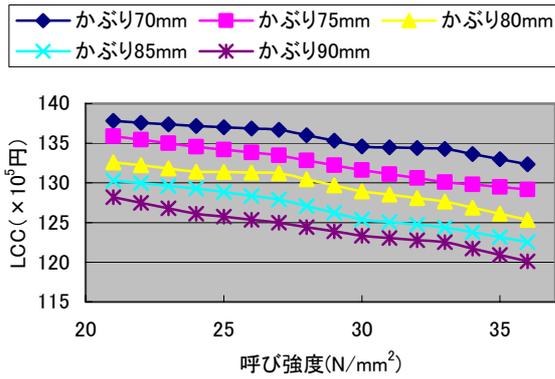


図-5 呼び強度の変化による LCC

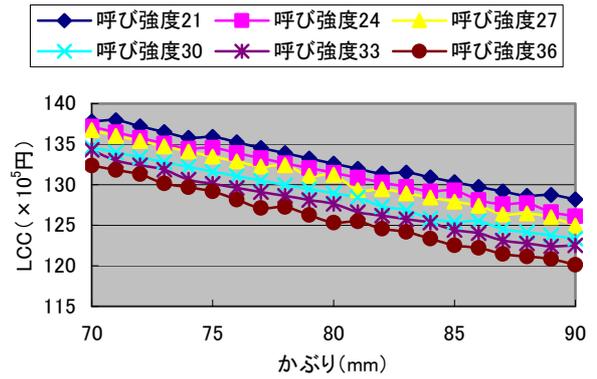


図-6 かぶりの変化による LCC

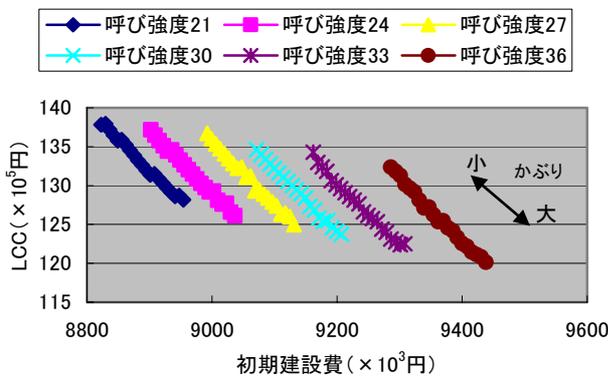


図-7 初期建設費と LCC の関係

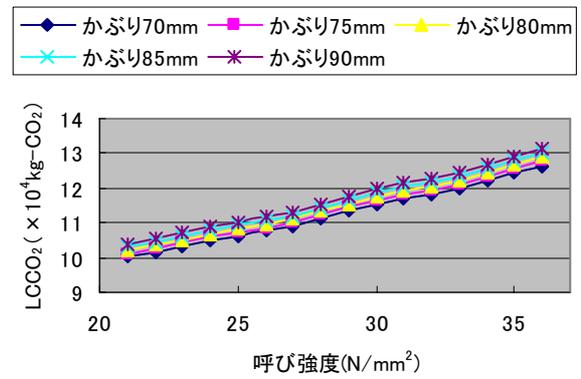


図-8 呼び強度の変化による LCCO<sub>2</sub>

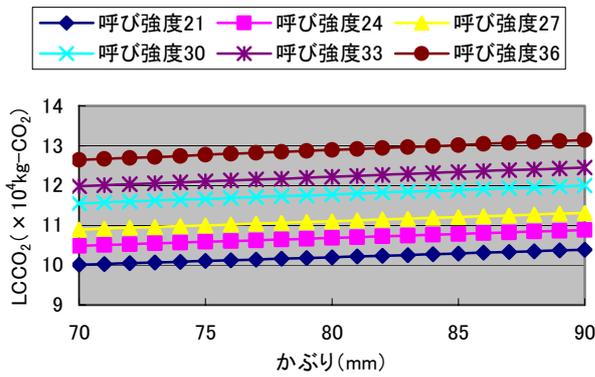


図-9 かぶりの変化による LCCO<sub>2</sub>

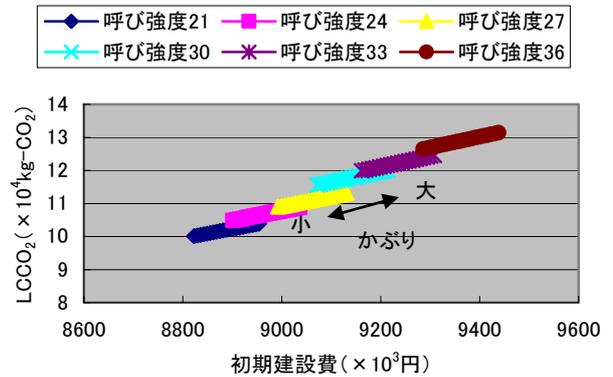


図-10 初期建設費と LCCO<sub>2</sub> の関係

#### 4.4 LCC および LCCO<sub>2</sub> の算定結果

##### (1) LCC

図-5 に呼び強度の強度値の変化による LCC 算定値, また図-6 にかぶりの変化による LCC 算定値を示す。これらによると, 本研究のように供用期間中の維持管理条件を同一にすると, かぶりや呼び強度が共に大きいほうが LCC は小

さい値となることがわかる。これは, 建替費が現在価値換算されているのが大きな理由と考えられる。

また, 初期建設費と LCC の関係を示した図-7 により, LCC の観点からは高品質なコンクリートを用いかぶりを大きく設定した構造物を建設することが良いということがわかった。

## (2) LCCO<sub>2</sub>

図-8 に呼び強度の強度値の変化による LCCO<sub>2</sub> 算定値, また図-9 にかぶりの変化による LCCO<sub>2</sub> 算定値を示す。これによると, 本研究のように供用期間中の維持管理条件を同一にすると, かぶりおよび呼び強度が共に小さいほうが LCCO<sub>2</sub> は小さい値となることがわかる。

また, 本研究の前提条件では初期建設費と LCCO<sub>2</sub> の関係を示した図-10 より, 性能を抑えた構造物を初期に建設することが LCCO<sub>2</sub> の観点からは良いこととなり, LCC とは逆の傾向が見られた。

### (3) LCC および LCCO<sub>2</sub> の年率による評価

ある構造物を対象に LCC, LCCO<sub>2</sub> を算定するとき, 一般的な手法としてはその構造物の使用年数, つまりライフスパンを仮定することが前提となっている。しかし, 今回のように構造物の品質を変化させることにより経済性や環境影響を評価する場合には, ライフスパンを一定に定めてしまうとその品質の良否が評価に十分組み込まれない可能性がある。

このために, 各かぶりと呼び強度の組合せごとに年率のコストおよび CO<sub>2</sub> 排出量を算定し, 再評価することを試みた。年率のコストおよび CO<sub>2</sub> 排出量は式(7), 式(8)で算定し, それぞれの結果を図-11, 図-12 に示した。

$$\text{年率 COST} = \frac{\text{施工時 COST}}{\text{建替年数}} \quad (7)$$

$$\text{年率 CO}_2\text{排出量} = \frac{\text{施工時 CO}_2\text{排出量}}{\text{建替年数}} \quad (8)$$

これらによると, かぶりや呼び強度が大きいほうが年率コストや CO<sub>2</sub> 排出量は共に小さい値となり, 初期段階に高品質なものを作り上げたほうが良いとの結果になった。

これは LCCO<sub>2</sub> の結果とは異なるものとなり, 評価項目や前提条件の違いによって大きく結果が異なるものであることがわかった。どのような評価方法が適切なのかを個々の場合において十分に考えなければいけないことがわかった。

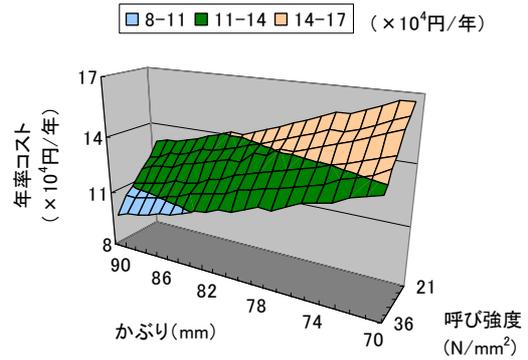


図-11 年率コストの算定図

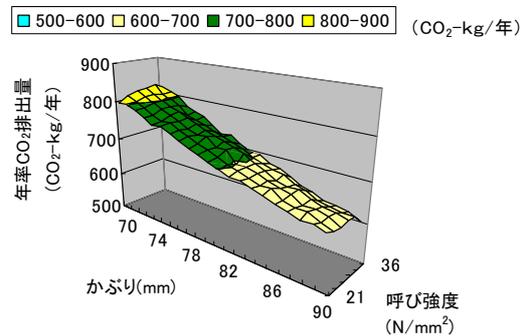


図-12 年率 CO<sub>2</sub> 排出量の算定図

## 4.5 統合化手法における評価

本研究における LCC や LCCO<sub>2</sub> の算定結果を比較すると, ライフスパンで考えたときには, 最適なかぶりと呼び強度の組合せは相反するものとなり, 総合的に判断しなければならないことがわかった。

以下に各統合化手法による結果を示す。

### (1) 環境効率指標を考慮した方法

図-13 に算定結果を示す。

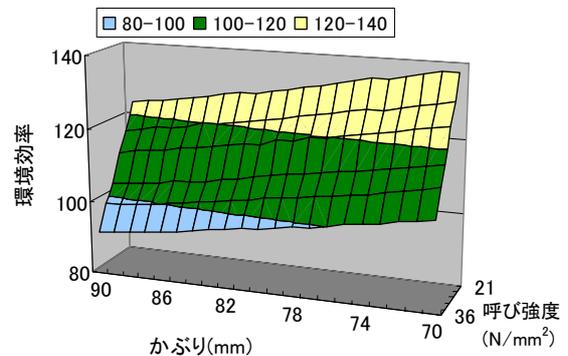


図-13 環境効率を考慮した算定図

本図によると、かぶりおよび呼び強度ともに小さいほうが環境効率は大きなものとなり、LCCO<sub>2</sub> 算定結果と同様になった。つまり今回の条件では、環境効率指標を用いることにより環境影響重視の統合結果が得られることになる。

### (2) 総合評価落札方式を考慮した方法

図-14 に算定結果を示す。

得られた結果によると、本研究の前提条件ではかぶりが大きく呼び強度が小さいほうがより評価の高いものとなった。これは、LCC 算定結果や LCCO<sub>2</sub> 算定結果とも異なるものであり、統合化による新たな結果と考えられる。

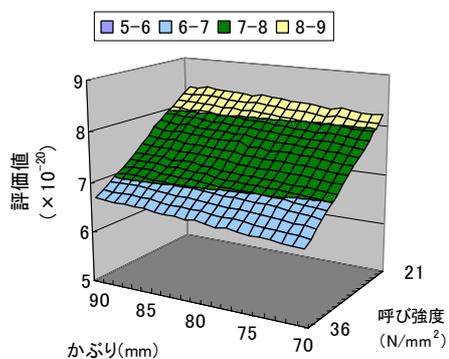


図-14 総合評価落札方式を考慮した算定図

### (3) 環境税を考慮した方法

図-15 に算定結果を示す。

得られた結果では呼び強度、かぶりが共に大きいほどコストは低いものとなり、LCC と同様の結果が得られた。つまり環境税による統合化では、経済性に重点をおく結果が得られることがわかった。

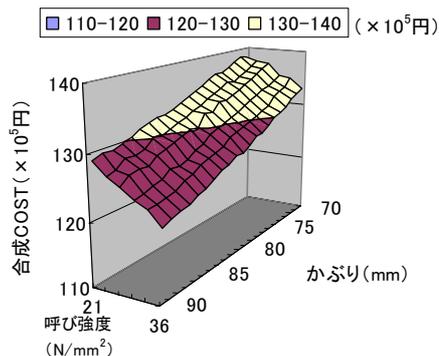


図-15 環境税を考慮した算定図

## 5. まとめ

社会基盤のあり方を考えると初期コストのみから判断するのは適切でなく、多くの観点による判断が必要である。しかし本研究から、評価手法や統合化手法を変化させることにより評価結果が異なる可能性がわかった。すなわち、LCC と LCCO<sub>2</sub> を統合的に評価する手法はいくつかあるが、それぞれで結果は相違していた。これは安易に構造物の経済性や環境影響を評価できないことを示している。

本研究の実施に当たっては、(株)東洋建設にご協力頂いた。記して感謝の意を表する次第である。

### 参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート技術シリーズ 62 コンクリート環境負荷評価（その2），土木学会，123pp.，2004
- 2) 環境省：環境税の具体案，<http://www.env.go.jp/policy/tax/041105/index.html>，2004.11
- 3) 伊庭 孝充，松島 学，関 博，川田 秀夫：塩害を受けるRC構造物のライフサイクルコスト算定手法に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.704/V-55，pp.1-11，2002.5
- 4) 土木学会コンクリート委員会：[2002年制定]コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，土木学会，2002