



---

# カーボンニュートラル（CN）を目指した コンクリート構造物の設計最適化

---

「第1回 エネルギー・環境論文コンテスト」



轟 水杜

埼玉大学大学院理工学研究科環境社会基盤専攻1年

担当教授：牧 剛史

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

現在世界では地球温暖化が深刻化している。2015年のパリ協定合意後、2020年、政府は「2050年カーボンニュートラル（CN）」を宣言し、低炭素化への取り組みも喫緊の課題とし<sup>[1]</sup>、近年では国内排出量取引も本格化している。

宣言を受け、様々な分野での試みがなされているが、土木分野においてもカーボンニュートラルへの取り組みは進んでおり、2020年の国・地方脱炭素会議では、構造物のライフサイクル全体を通してCO<sub>2</sub>排出量を削減することが宣言された。

日本のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量のうち38%が産業部門、そのうち8%が窯業・土石製品製造業（セメント産業）からというのが現状である<sup>[2]</sup>。CNに向けた取り組みとしては、建築・構造物の施工における重機械の技術開発・CO<sub>2</sub>排出量を削減できる材料の使用や開発（CO<sub>2</sub>吸収コンクリートや低炭素コンクリート）が主だ<sup>[3]</sup>。

設計施工段階・材料由来の低炭素化は進められているものの、「設計段階の部材形状や断面形状の決定」においてのCO<sub>2</sub>排出量削減の例は少ない。これは、CO<sub>2</sub>排出量削減案が具体化されておらず、企業での削減推進のモチベーションも上がらないことが原因として考えられるだろう。

## 1.2 研究目的

構造設計の段階において、現状は初期建設費が最小となるような設計解を選択しているが、近年のCN推進に向け、建設業界も構造物の設計・施工においてCO<sub>2</sub>排出量を無視できない。そのため、設計段階での構造物の形状決定に「CO<sub>2</sub>排出量」を組み込む必要がある。

構造設計は「設計→照査→設計解の選択」の一連の流れを実行することである。「設計（狭義）」とは、構造物の形式や形状を具現化する行為で、「照査」とは、定められた厳格なルールに則って構造物が要求性能を満足することを証明する行為である。よって照査は「制約条件」とも呼べる。構造設計における制約条件（照査式）は例えば、耐力、疲労、ひび割れ幅等がある。「設計変数」とは構造設計における変数で、例えば、部材数、部材寸法、部材の種類や強度等である<sup>[5]</sup>。

数ある設計解の中から一つ選択するために「目的関数」を設定するが、先に述べたように現状では「初期建設費」を最小化する最適設計解が選択されている。その目的関数を「CO<sub>2</sub>排出量」とした場合に構造物の形状がどのように変わるかについて検討・評価することを本研究の目的とする。株式会社HRC研究所<sup>1</sup>のご協力のもと、234委員会<sup>2</sup>の試算方法を参照して本研究を進めている。

---

<sup>1</sup> 1986年設立。札幌市豊平区に本社を置く。鉄道、道路、上下水道等の構造物に関する調査・設計・解析に関する業務を行っている。

<sup>2</sup> 土木学会「カーボンニュートラルに向けたコンクリート分野の新技术活用に関する研究小委員会」の略称。



## 2.2 最適設計解算出と目的関数最小解算出の流れ

制約条件を満足する最適解と目的関数最小解算出の流れを以下のフローチャートで示す(図 2-4)。「START」から「照査」までが制約条件を満足する設計解算出の流れである<sup>[5]</sup>。

照査式をすべて満足した設計解の中から目的関数を最小化するまでの流れが「照査」から「最小解算出(END)」となる。「目的関数の算出→計算処理→目的関数の最小化」はループ作業である。計算処理は Excel を使用し、計算結果より目的関数が最小となる設計解を選出する。選出された設計解が「目的関数最小解」となり「END」となる。

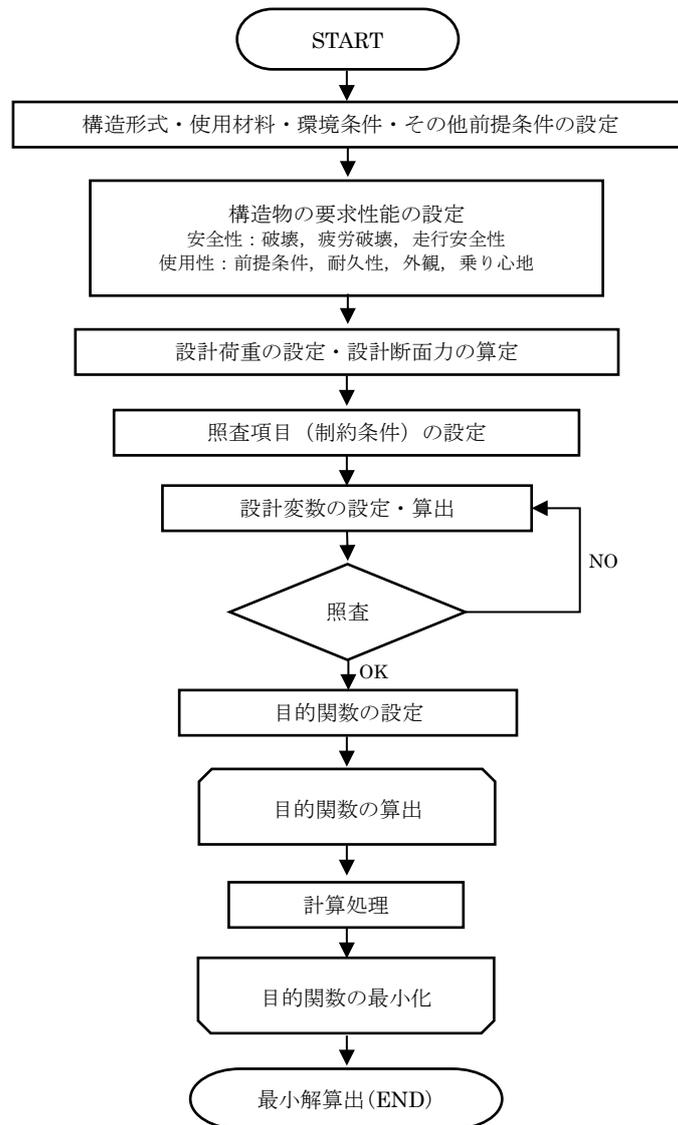


図 2-4 最適設計解算出と目的関数最小解算出の流れ

## 2.3 検討の条件

### 2.3.1 固定した設計条件

#### ① 環境条件

環境条件区分は一般環境，水セメント比は 50%，設計耐用期間は 100 年と設定する<sup>[7]</sup>。

#### ② 使用材料

##### ● コンクリート

セメント種別：普通ポルトランドセメント

骨材種別：普通骨材

粗骨材の最大寸法：25 mm

最大水セメント比：50%

ヤング係数：コンクリートの設計基準強度 $f'_{ck}=21, 27$  [N/mm<sup>2</sup>]を加えて以下の表 2-1 を参照する<sup>[8]</sup>。

表 2-1 コンクリートのヤング係数 $E_c$  [kN/mm<sup>2</sup>]

コンクリートの種類	設計基準強度 $f'_{ck}$ [N/mm <sup>2</sup> ]				
	18	21	24	27	30
普通骨材コンクリート	22.0	23.5	25.0	26.5	28.0

##### ● 鋼材

ヤング係数：200kN/mm<sup>2</sup>

特性値：鋼材の引張降伏強度及び引張強度の特性値（設計引張強度）は以下の表 2-2 を参照し，下限値を用いる<sup>[9]</sup>。

表 2-2 鉄筋コンクリート用棒鋼の機械的性質

鉄筋の種類	種類の記号	降伏点 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強さ [N/mm <sup>2</sup> ]
異形棒鋼	SD345	345～440	490 以上
	SD390	390～510	560 以上

引張側の鉄筋：1 段配置に固定

圧縮側の鉄筋量：D13-30 本

せん断補強鉄筋径：D13

#### ③ 設計かぶり

水セメント比 50%，一般環境でブリーディングの影響のない場合，最小かぶりは 40 mm である。

### 2.3.2 設計荷重

#### ① 永久荷重

- 固定死荷重

主桁の断面高さによって固定死荷重が変わる。

- 付加死荷重

今回検討対象とした単純桁に付随する高欄・地覆・ダクト・ケーブルの付加死荷重を永久荷重とし、値は断面高さによって変わらず一定である。

#### ② 変動荷重

- 列車荷重

鉄道構造物等設計標準・同解説に基づき、以下の標準列車荷重（図 2-5）を用いて算定する<sup>[8]</sup>。

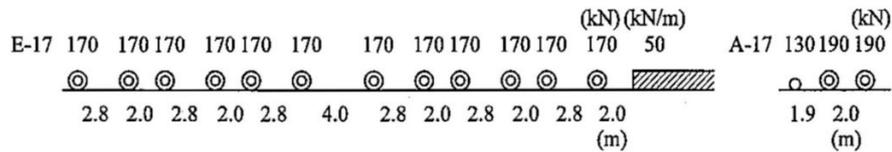


図 2-5 標準列車荷重<sup>[7]</sup>

- 衝撃荷重

衝撃荷重の特性値は各性能の列車荷重の特性値に設計衝撃係数 $i$ を乗じている。

### 2.3.3 設計変数

検討に用いる設計変数を以下に示す。

- 桁高（断面高さ） $H$ （0.6m, 0.65m, 0.7m, 0.8m, 0.9m, 1.0m の 6 ケース）
- コンクリートの設計基準強度 $f'_{ck}$ （18N/mm<sup>2</sup>, 21N/mm<sup>2</sup>, 24N/mm<sup>2</sup>, 27N/mm<sup>2</sup>, 30N/mm<sup>2</sup> の 5 ケース）
- 鉄筋の強度 $f_y$ （345N/mm<sup>2</sup>= ‘SD345’, 390N/mm<sup>2</sup>= ‘SD390’ の 2 ケース）  
低強度コンクリートと高強度鉄筋の組合せは付着の観点から非現実的であると判断できるため、本検討では SD490 は除いた設計変数を用いた。
- 引張側の鉄筋量  
鉄筋径と本数は、制約条件を満足するように定めている。実設計においては支点方向に向かってせん断補強鋼材量が増加し、スパン中央方向に向かって軸方向鉄筋量が増加するという設計が採用されている。よって、本検討の鉄筋量と実設計の鉄筋量は正確には異なるが、本検討では簡単のため算出された設計解を標準設計とする。
- せん断補強鉄筋量（本数）

### 2.3.4 制約条件

鉄道構造物等設計標準・同解説に基づき、各限界状態に対して以下の設計荷重の組合せ（表 2-3）を適用する<sup>[8]</sup>。

表 2-3 各限界状態の照査に用いる設計荷重の組合せ

要求性能	性能項目	設計荷重の組合せ	備考
安全性	破壊	$1.1D_1 + 1.2D_2 + 1.1L + 1.1I + L_F$	変動荷重(列車荷重)
	疲労破壊	$D_1 + D_2$	永久荷重による鉄筋の最小応力度 $\sigma_{\min}$ 算出用
		$L + I$	標準列車荷重により生じる鉄筋の最大変動応力度 $\sigma_{\text{srd}}$ 算出用
	走行安全性	$L + I$	たわみ算出用(列車荷重)
使用性	前提条件	$D_1 + D_2$	コンクリート縁圧縮応力度算出用
	外観	$D_1 + D_2 + L + I$	コンクリート縁引張応力度算出用
		$D_1 + D_2$	ひび割れ幅算定式検討用
	乗り心地	$L + I$	たわみ算出用(列車荷重)
耐久性	ひび割れ	$D_1 + D_2 + L + I$	コンクリート縁引張応力度算出用
		$D_1 + D_2$	ひび割れ幅算定式検討用

$D_1$  : 固定死荷重 (効果)

$D_2$  : 付加死荷重 (効果)

$L$  : 列車荷重 (効果)

$I$  : 衝撃荷重 (効果)

安全性 (破壊・走行安全性) の照査に用いる設計衝撃係数を  $I = I_1 (i_1 = 0.273)$

安全性 (破壊・走行安全性) の照査以外に用いる設計衝撃係数を  $I = I_2 (i_2 = 0.205)$

$L_F$  : 車両横荷重 (効果)

本来の設計荷重に含まれているが、本研究の計算ではねじりモーメントの検討は行わないため使用していない。

## 2.4 目的関数

照査を満足した設計解から、目的関数を最小化された設計解を最適設計解とする。初期建設費と CO<sub>2</sub> 排出量の算定方法は 234 委員会試算の算定方法と同様である。

### 2.4.1 初期建設費

目的関数を初期建設費とした場合の式は以下で表される。

$$C = V_c \cdot C_c \cdot \alpha_c + W_s \cdot C_s \cdot \alpha_s \quad (2.1)$$

$C$  : 初期建設費 [千円]

$V_c$  : コンクリートの総体積 [m<sup>3</sup>]

$C_c$  : コンクリートの材工単価 [千円/m<sup>3</sup>]

$\alpha_c$  : コンクリートの強度に応じた単価比

$W_s$  : 鉄筋の総質量 [t]

$C_s$  : 鉄筋の材工単価 [千円/t]

$\alpha_s$  : 鉄筋の強度に応じた単価比

### 2.4.2 CO<sub>2</sub> 排出量

目的関数を CO<sub>2</sub> 排出量とした場合の式は以下のようなになる。

$$CN = V_c \cdot C_{cc} \cdot \alpha_{cc} + W_s \cdot C_{sc} \cdot \alpha_{sc} \quad (2.2)$$

$CN$  : CO<sub>2</sub> の総排出量 [kg-CO<sub>2</sub>]

$V_c$  : コンクリートの総体積 [m<sup>3</sup>]

$C_{cc}$  : コンクリートの CO<sub>2</sub> 排出量の原単位 [kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>]

$\alpha_{cc}$  : コンクリートの強度に応じた CO<sub>2</sub> 排出量比

$W_s$  : 鉄筋の総質量 [t]

$C_{sc}$  : 鉄筋の CO<sub>2</sub> 排出量の原単位 [kg-CO<sub>2</sub>/t]

$\alpha_{sc}$  : 鉄筋の強度に応じたにさ CO<sub>2</sub> 排出量比

なお、コンクリートと鉄筋の材工単価および CO<sub>2</sub> 排出量の原単位については次頁の表 2-4, 表 2-5 の値を用いている。

表 2-4 コンクリートおよび鉄筋の材工単価および CO<sub>2</sub>排出量の原単位

	コンクリート		鉄筋	
材工単価	$C_c$	65.1 [千円/m <sup>3</sup> ]	$C_s$	89.0 [千円/m <sup>3</sup> ]
CO <sub>2</sub> 排出量の原単位	$C_{cc}$	341.68 [kg-CO <sub>2</sub> /t]	$C_{sc}$	1453.54 [kg-CO <sub>2</sub> /t]

表 2-5 材料強度に応じた単価比および排出量比

	コンクリートの強度 [N/mm <sup>2</sup> ]					鉄筋の強度 [N/mm <sup>2</sup> ]			
		18	21	24	27	30		345	390
単価比	$\alpha_c$	0.96	0.98	1	1.02	1.04	$\alpha_s$	1	1.04
排出量比	$\alpha_{cc}$	0.84	0.92	1	1.08	1.16	$\alpha_{sc}$	1	1

## 2.5 検討ケース

上記の目的関数について適当な値を入力し、目的関数を最小化した設計解を算出する。検討ケースは以下の2つである（表 2-6）。

表 2-6 検討ケース

Case	照査項目	最小化項目（目的関数）
1	安全性（破壊, 疲労破壊, 走行安全性）	初期建設費
2	使用性（外観, 乗り心地） 耐久性（ひび割れ）	

## 第3章 算定結果と考察

### 3.1 安全性・使用性・耐久性の照査を満足する構造諸元

断面高さコンクリート総容積及び安全性・使用性・耐久性の照査を満足する鉄筋の総質量の関係を図 3-1 に示す。また、コンクリート強度と鉄筋の総質量の関係を図 3-2 に示す。

今回の検討では断面幅は固定し、スパン方向に均一の断面で仮定したため、コンクリート体積は断面高さに対して線形的に増加する結果となった。照査を満足する鉄筋の総質量は、断面高さの増加及び鉄筋強度の増加に対し減少する。コンクリート強度の増加とともに鉄筋の総質量は若干減少するか同一である。

照査の段階において、“疲労破壊”の検討<sup>3</sup>で「鉄筋の応力度」の照査が最も厳しい制約条件となる。疲労破壊の検討では、制限値を超えないように縛りがあり、鉄筋の応力度がなるべく小さくなるように軸方向鉄筋量は決定される。

断面高さが 0.65m においては鉄筋強度の大小にかかわらず鉄筋総質量がおおよそ一致している。これは、SD390 の方が鉄筋の引張強度の特性値が大きく ( $560\text{N/mm}^2$ )、200 万回疲労強度  $f_{sr200}$  が相対的に小さくなるため、SD345 よりわずかに余裕を持った状態で照査を満足する軸方向鉄筋量に至ったためと言える。同一鉄筋量において、SD345 より SD390 の方が疲労破壊の検討に余裕があるが、SD390 の引張鉄筋の本数を 1 本減らすと照査を満足できないので、このような結果になった。

---

<sup>3</sup> 疲労破壊の照査式

$$\gamma_i \cdot \frac{\sigma_{srd}}{f_{sr200}/\gamma_b} \leq 1.0$$

$\sigma_{srd}$  : 標準列車荷重により生じる鉄筋の最大変動応力度

$f_{sr200}$  : 200 万回疲労強度

$\gamma_i$  : 構造物係数 (=1.1)

$\gamma_b$  : 部材係数 (=1.0)

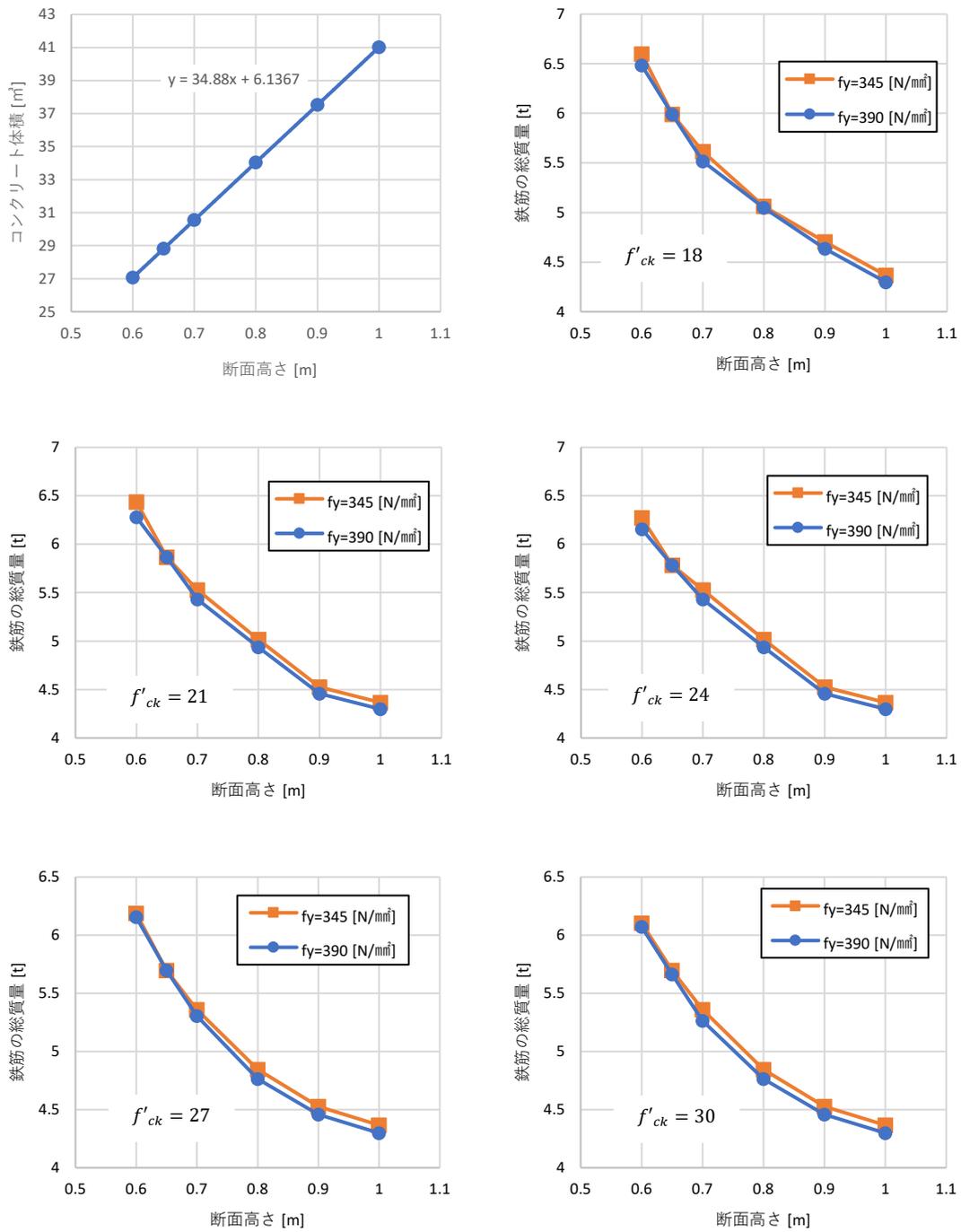


図 3-1 断面高さとコンクリート総容積および安全性・使用性・耐久性の照査を満足する鉄筋の総質量の関係

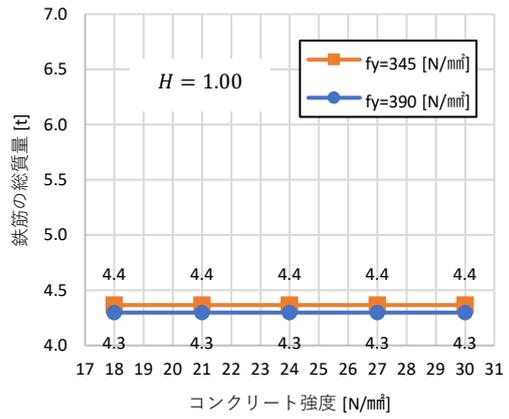
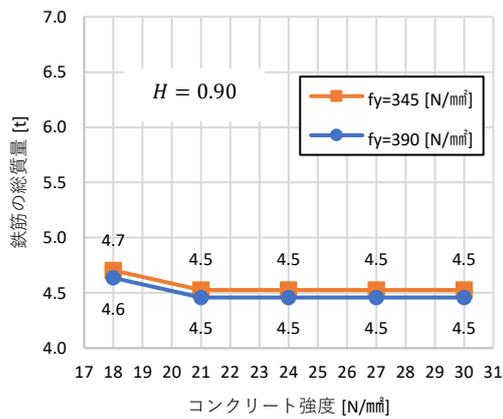
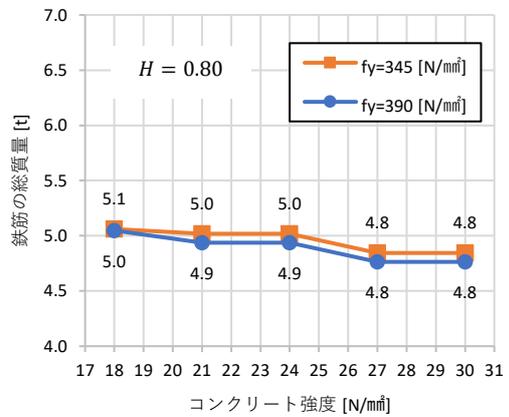
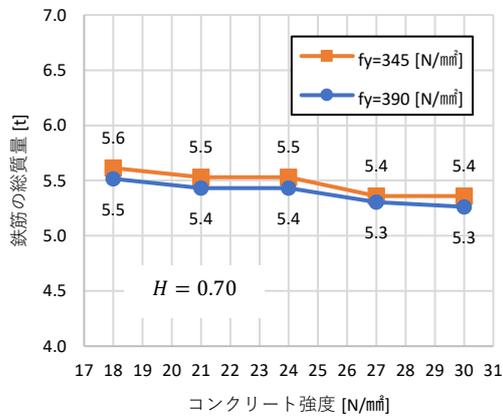
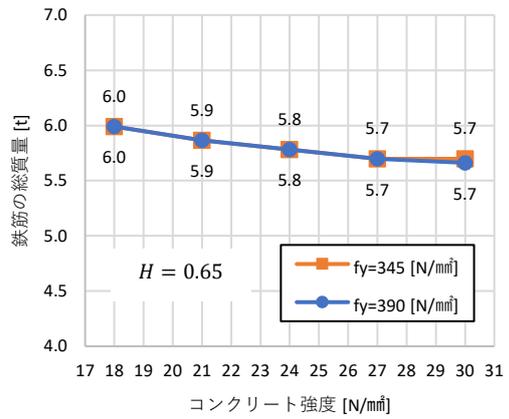
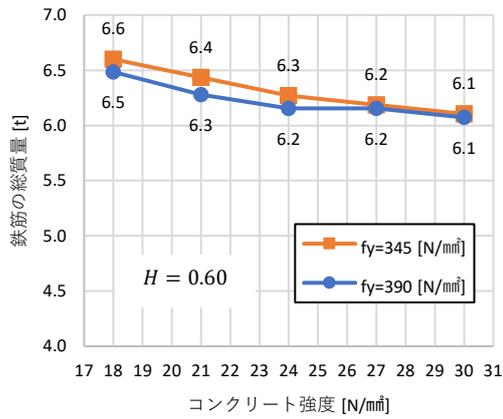


図 3-2 コンクリート強度と安全性・使用性・耐久性の照査を満足する鉄筋の総質量の関係

### 3.2 Case1 : 初期建設費

図 3-3 に材料強度の組合せと建設費の関係を示す。照査を満足する設計解全 60 パターンから建設費が最小となる値を選出した。

表 2-7 Case1 : 初期建設費最小解

Case	目的関数	断面高さ [m]	コンクリート強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張鉄筋		せん断補強鉄筋	
				鉄筋強度	鉄筋径-本数	鉄筋径-本数	間隔 [mm]
1	建設費	0.60	18	SD345	D41-31	D13-6	100

建設費最小解となった断面高さ $H=0.60$  [m]のケースについて材料強度の組合せごとと比較を行った結果を図 3-4 に示す。どの材料強度の組合せにおいても、コンクリート費用が鉄筋費用の約 3 倍を占めている。

断面高さが 0.60m で同一のためコンクリート体積も同一であるが、コンクリート強度が上がると強度に対する単価比も増加するためコンクリート費用は増加する。コンクリート強度が上がるほど、照査を満足するための鉄筋量は減少する。そのため鉄筋費用はわずかに減少すると考えられる。

断面高さと建設費の関係を図 3-5 に示す。断面高さの増加と材料強度の増加とともに建設費は増加する。鉄筋強度が低い組合せの方が高い方に比べて建設費が削減される。これは、鉄筋強度が高い方に比べて、鉄筋強度が低い方は照査を満足する鉄筋量が増加するが、その鉄筋量増加によるコスト増加分より鉄筋強度が小さいことによる単価比 (1.00 : 1.04) のコスト減少分が上回ったためであると考えられる。

建設費最小解において低強度コンクリートを使ってもなお断面高さが 0.60m と、実設計の断面高さを下回る結果となった。「断面高さ $H=0.60$  [m], コンクリート強度 $f'_{ck}=18$  [N/mm<sup>2</sup>]」において照査を満足する鉄筋の総質量は約 6.6t, 「断面高さ $H=0.65$  [m], コンクリート強度 $f'_{ck}=27$  [N/mm<sup>2</sup>]」において照査を満足する鉄筋の総質量は約 5.7t であり、約 0.9t の差が生じる。つまり、実設計において使用される鉄筋量を大きく上回る値で設定すればコンクリート強度と断面高さが小さくても設計上では問題がないことを意味する。

標準設計解より断面高さを小さくし鉄筋量を増加させることで、力学的には照査を満足し、かつコスト低減にもなる設計が存在することが示唆される。

また、国土交通省より橋梁設計のガイドラインでは、水セメント比などを考慮し、コンクリートの設計基準強度 $f'_{ck}$ が 24~30N/mm<sup>2</sup> で設定されている。そのため $f'_{ck}=27$  [N/mm<sup>2</sup>]を標準設計として採用されていることも結果の相違に関係していると思われる。

どのコンクリート強度に対しても、コンクリート費用は断面高さに対して線形的に増加する。鉄筋費用はわずかであるが減少傾向にある。図 3-4 から分かる通り、建設費はほとんどコンクリート費用に依存すると考えられる。

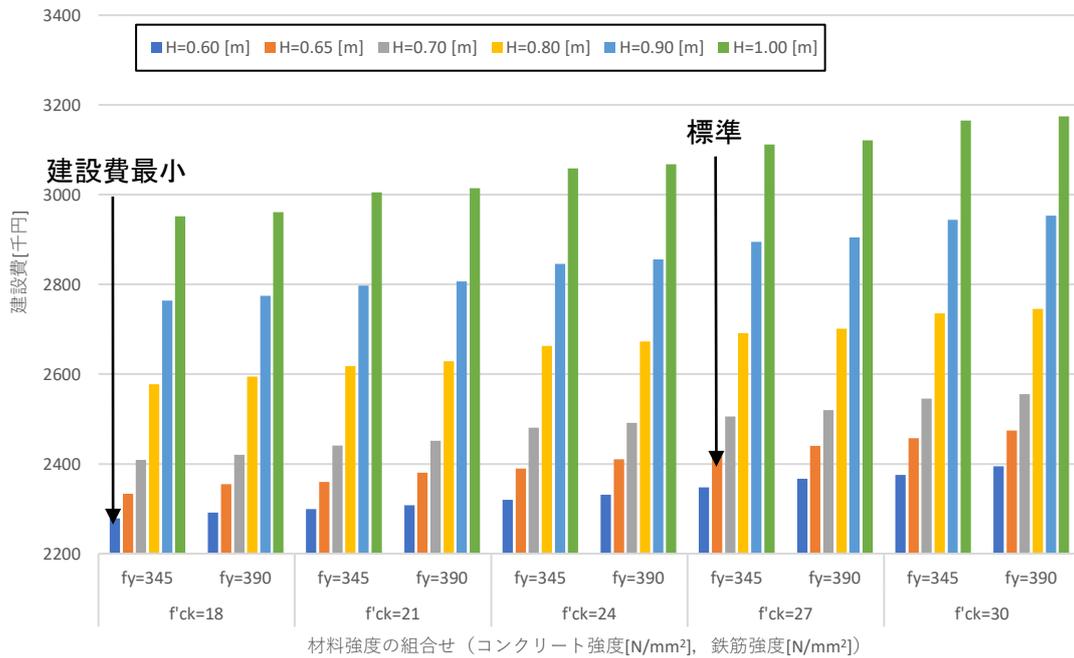


図 3-3 Case1 : 材料強度の組合せと建設費の関係

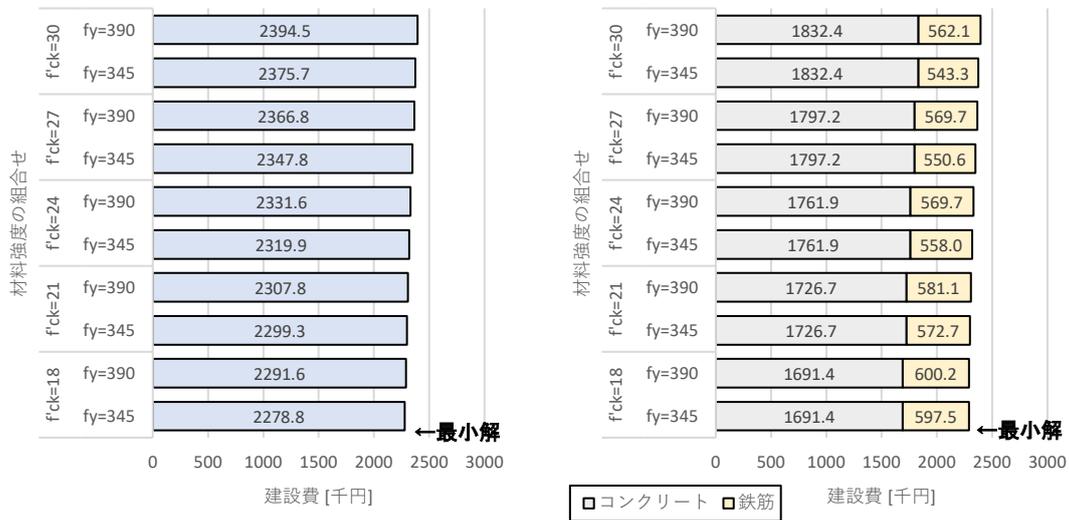


図 3-4 Case1 : 建設費の算定結果 (H=0.60) (左 : 合計, 右 : 材料毎の内訳)

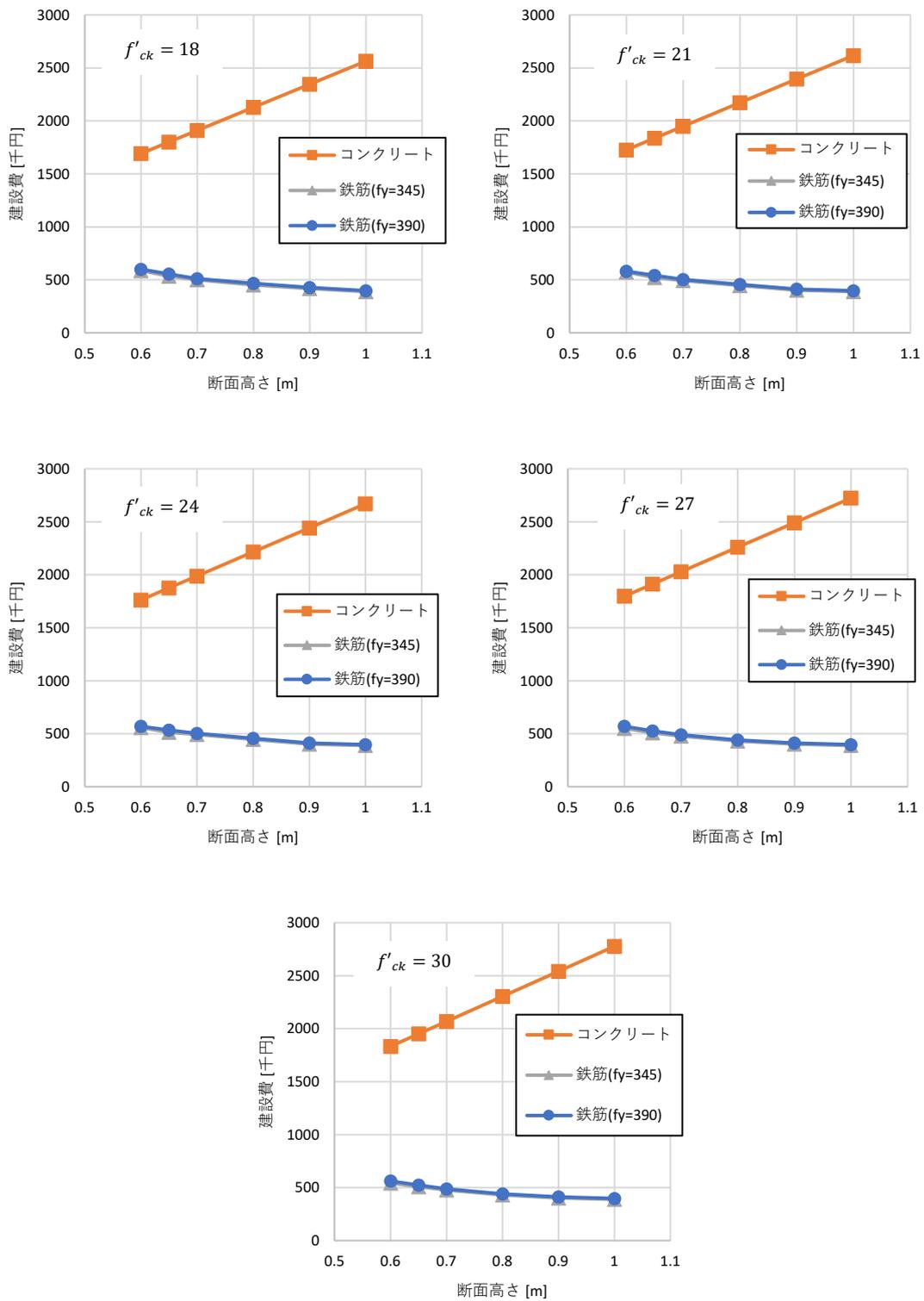


図 3-5 Case1 : 断面高さと建設費の関係

### 3.3 Case2 : CO<sub>2</sub>排出量

図 3-6 に材料強度の組合せと CO<sub>2</sub> 排出量の関係を示す。CO<sub>2</sub> 排出量最小解は建設費最小解とは異なる結果となった。

表 2-8 Case2 : CO<sub>2</sub>排出量最小解

Case	目的関数	断面高さ [m]	コンクリート強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張鉄筋		せん断補強鉄筋	
				鉄筋強度	鉄筋径-本数	鉄筋径-本数	間隔 [mm]
2	CO <sub>2</sub> 排出量	0.70	18	SD390	D38-29	D13-5	100

CO<sub>2</sub> 排出量最小解となった断面高さ 0.70m のケースについて材料強度の組合せごとに比較を行った結果を図 3-7 に示す。コンクリート強度の増加に伴いコンクリートによる CO<sub>2</sub> 排出量は増加する。これは、同一断面高さに対しコンクリート強度が上がるにつれ CO<sub>2</sub> 排出量比も上がるためである。

一方、鉄筋の CO<sub>2</sub> 排出量はわずかに減少している。コンクリート強度別に見ると、鉄筋の CO<sub>2</sub> 排出量減少率はコンクリートの CO<sub>2</sub> 排出量増加率に比べるとわずかである。

断面高さ と CO<sub>2</sub> 排出量の関係を図 3-8 に示す。同一コンクリート強度に対しては、CO<sub>2</sub> 排出量はコンクリート体積にほとんど依存していると言える。最小解の断面高さは、建設費最小解の断面高さ 0.60m、標準設計の断面高さ 0.65m よりも値が大きい。よって、コンクリート体積を増やし、鉄筋強度を増加させ、鉄筋本数を減少させた方がカーボンニュートラル貢献となる可能性があることが示された。

鉄筋の CO<sub>2</sub> 排出量比 $\alpha_{sc}$ は鉄筋強度に関係ないため、CO<sub>2</sub> 排出量の算定式(2.2)では、鉄筋による CO<sub>2</sub> 排出量は鉄筋量に依存していると言える。そのため、SD345 の設計解よりも鉄筋量がわずかに少ない鉄筋強度 SD390 の方が鉄筋による CO<sub>2</sub> 排出量は減少する。

一方コンクリートは、コンクリート強度の増加によって CO<sub>2</sub> 排出量比も大きくなるため、断面高さが大きくなれば当然コンクリートによる CO<sub>2</sub> 排出量は増加する。そのため、断面高さが増加するにつれ全体としても CO<sub>2</sub> 排出量が増加すると言える。

コンクリート強度 18, 21N/mm<sup>2</sup> では断面高さ 0.70m において、24, 27N/mm<sup>2</sup> では断面高さ 0.65m において、30N/mm<sup>2</sup> では断面高さ 0.60m において、(材料強度別で) CO<sub>2</sub> 排出量最小となり、Case1 とは異なる挙動を示した。

照査においてクリティカルとなる検討条件が、「鉄筋の応力度」の照査であり、同じコンクリート体積に対して鉄筋量が少ない設計解ほど CO<sub>2</sub> 排出量は少ない。式(2.2)より、 $f'_{ck}=18, 21$  [N/mm<sup>2</sup>] では原単位や CO<sub>2</sub> 排出量比の関係から  $H=0.70$  [m] で、 $f'_{ck}=24, 27$  [N/mm<sup>2</sup>] では  $H=0.65$  [m] で、 $f'_{ck}=30$  [N/mm<sup>2</sup>] では  $H=0.60$  [m] でトレードオフの最適解となることが分かる。

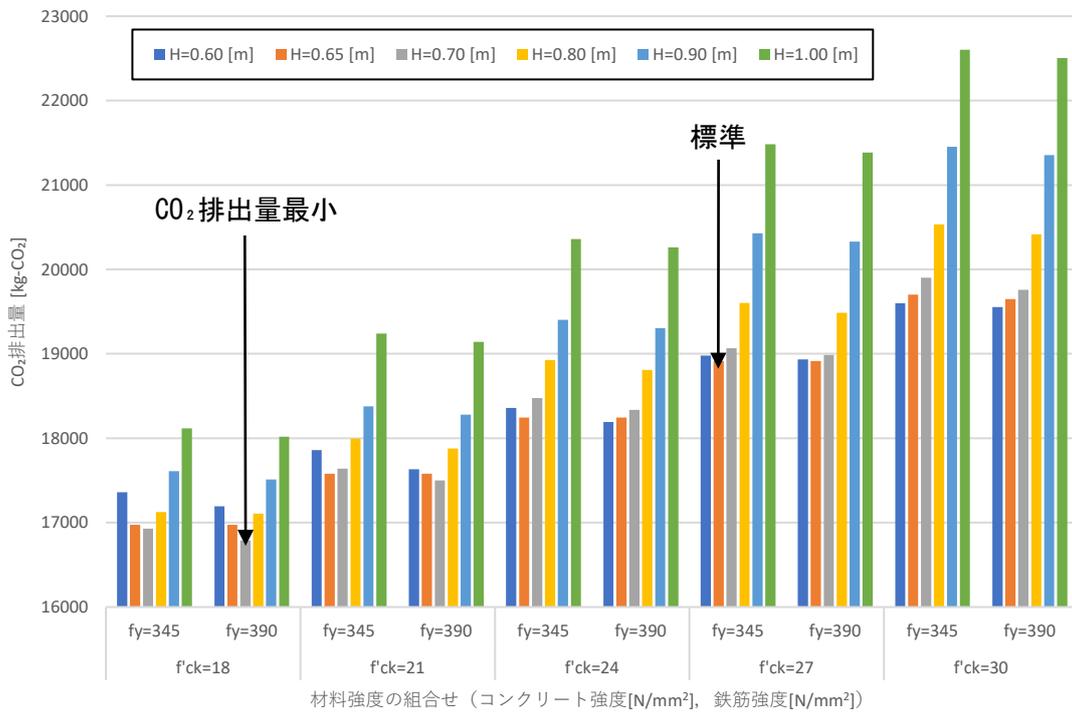


図 3-6 Case2 : 材料強度の組合せと CO<sub>2</sub>排出量の関係

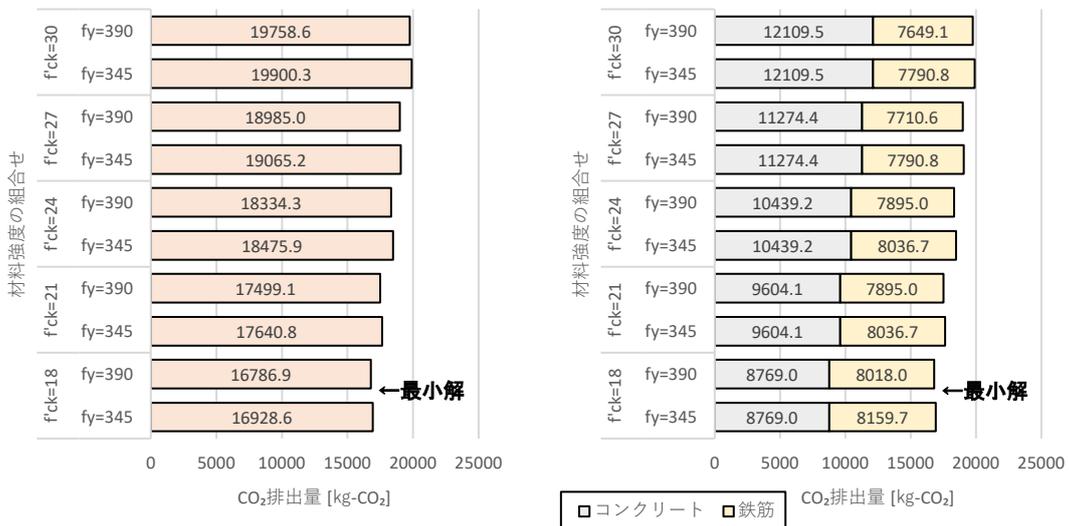


図 3-7 Case2 : CO<sub>2</sub>排出量の算定結果 (H=0.70) (左 : 合計, 右 : 材料毎の内訳)

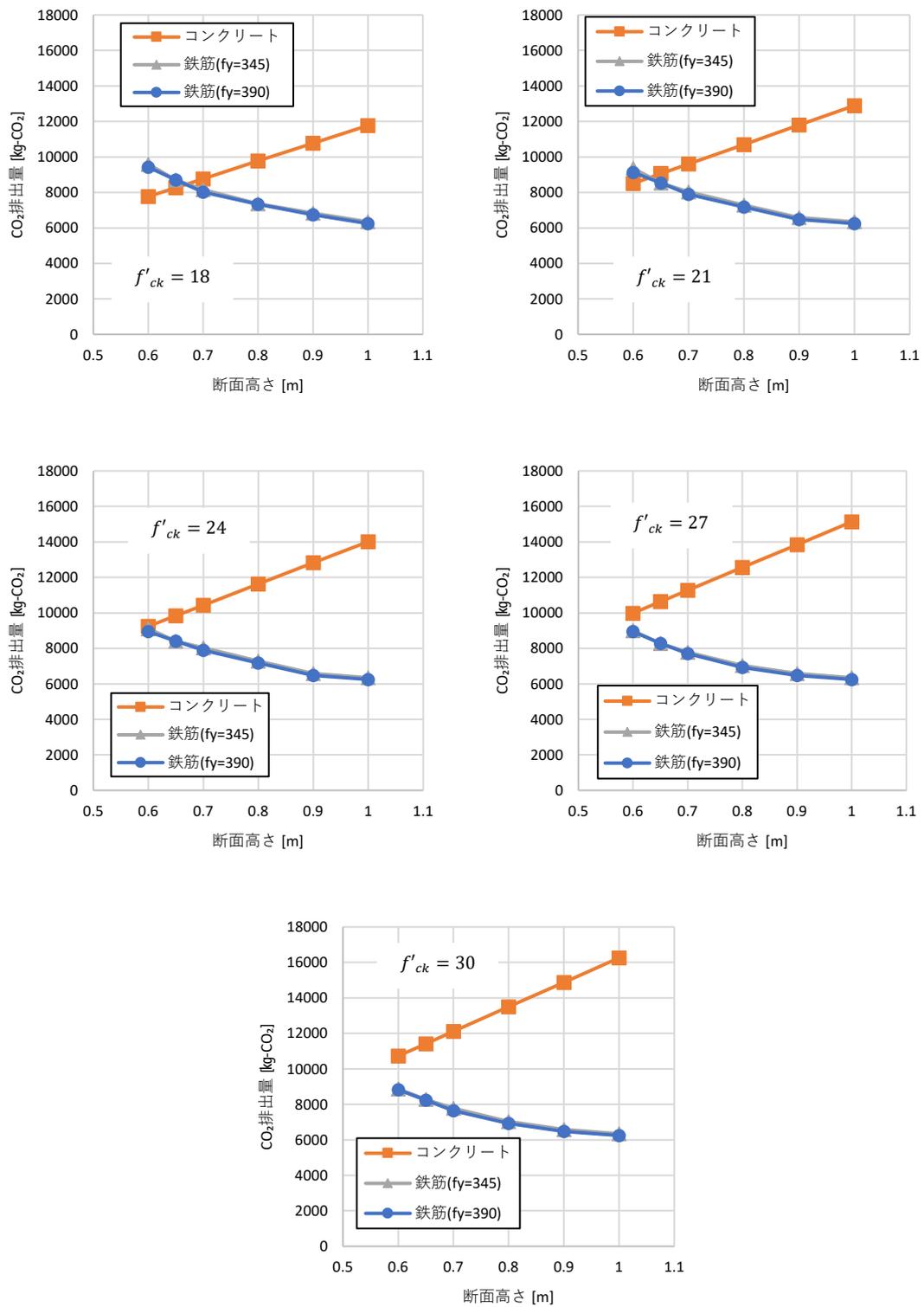


図 3-8 Case2 : 断面高さ と CO<sub>2</sub> 排出量 の関係

### 3.4 標準設計との比較

図 3-9 に標準設計の断面高さと同建設費最小となる断面高さにおける材料強度の組合せと建設費の関係を示す。標準設計における初期建設費は 2,420.1 千円であり、建設費最小解を採用すれば、約 5.8% (約 141.3 千円) コスト削減ができる。CO<sub>2</sub> 排出量最小解を選択してもコスト削減にはなるが、僅か 100 円のみ差であるため、概ね変わらないと言えるだろう。

図 3-10 に標準設計の断面高さと同 CO<sub>2</sub> 排出量最小となる断面高さにおける材料強度の組合せと CO<sub>2</sub> 排出量の関係を示す。CO<sub>2</sub> 排出量最小解は建設費最小解より約 1.1% (約 573 kg-CO<sub>2</sub>) 二酸化炭素の排出を削減できる。さらに、標準設計より約 3.0% (約 2,126 kg-CO<sub>2</sub>) 二酸化炭素の排出を削減できる。

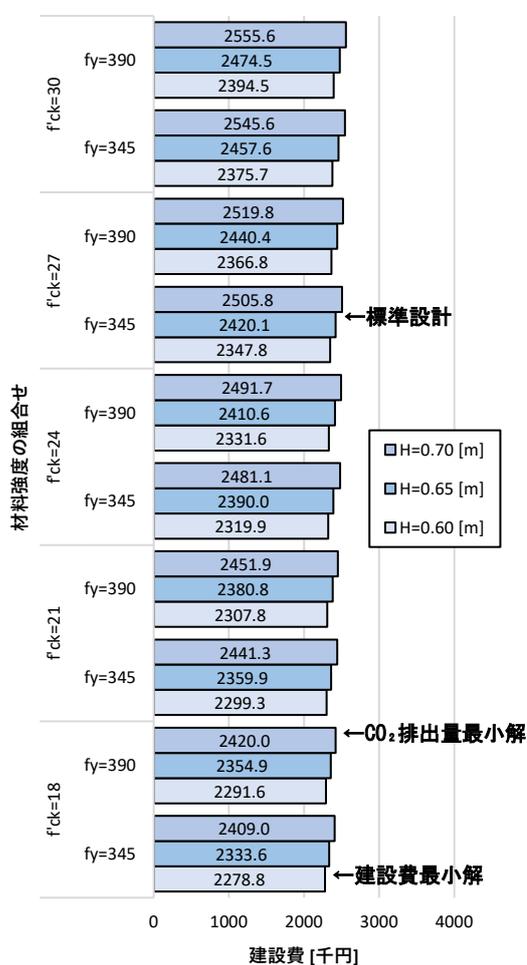


図 3-9 安全性・使用性・耐久性の照査を満足する設計解の材料強度の組合せと建設費の関係

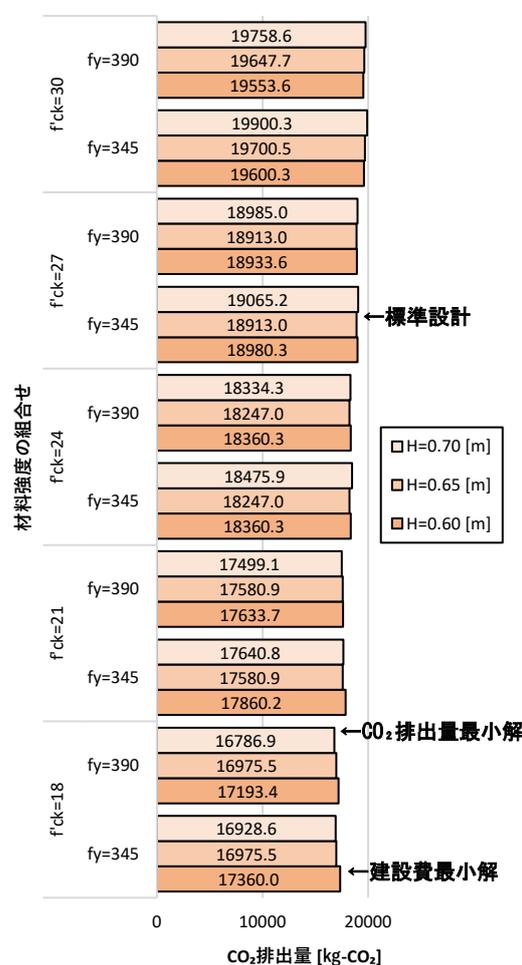
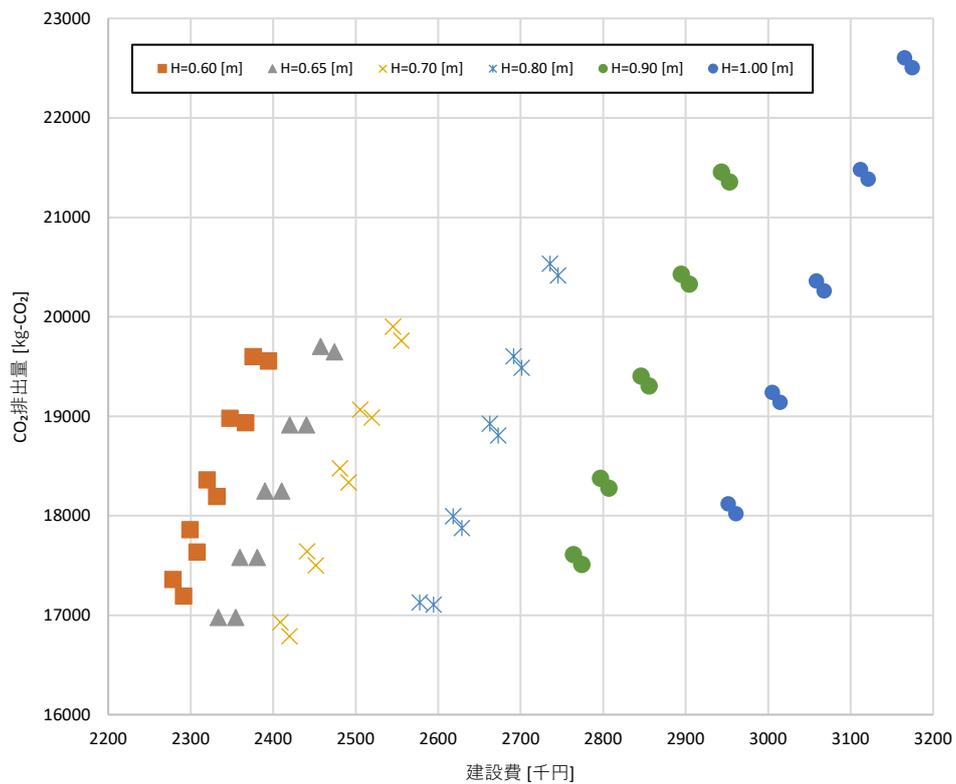


図 3-10 安全性・使用性・耐久性の照査を満足する設計解の材料強度の組合せと CO<sub>2</sub> 排出量の関係

### 3.5 建設費とCO<sub>2</sub>排出量の関係

建設費とCO<sub>2</sub>排出量の関係を以下に示す(図3-11)。

CO<sub>2</sub>排出量最小解と建設費最小解が一致していないことが分かる。断面高さ $H$ ごとに比較すると、必ずしもコンクリート体積を小さくすればCO<sub>2</sub>排出量も減少するとは言えないことが示唆された。



## 結論

- (1) 低強度コンクリートと高強度鉄筋の組合せは付着の観点から非現実的であると判断できるため、本検討ではSD490は除いた設計変数を用いた。さらに、引張側の軸方向鉄筋は2段配置ではなく1段配置に固定した。そのため234委員会の試算結果とは異なる結果となった。
- (2) 標準設計においては「断面高さ0.65m、コンクリート強度27N/mm<sup>2</sup>、鉄筋SD345」が採用されているが、建設費最小となる解は、「断面高さ0.60m、コンクリート強度18N/mm<sup>2</sup>、鉄筋SD345」であった。断面高さとコンクリート強度に違いが生じたが、本検討では実設計より簡単な構造形式や鉄筋配置を採用していることや、実設計においてはコンクリート強度が低い材料はあまり使用しないことが原因として考えられる。
- (3) 本検討全体を通して、コンクリート体積の増加に伴い、初期建設費とCO<sub>2</sub>排出量はどちらも増加する。初期建設費、CO<sub>2</sub>排出量ともにコンクリートボリュームが有利に影響すると言える。
- (4) 初期建設費最小設計解について、鉄筋量減少によるコスト減少分より鉄筋の高強度化による単価比(1.00:1.04)のコスト増加分が上回ったため、コンクリート強度は最小の18N/mm<sup>2</sup>、鉄筋はSD390の組み合わせが最適解となった。
- (5) CO<sub>2</sub>排出量最小設計解について、照査においてクリティカルとなる検討条件により、鉄筋の応力度が比較的小さくなる断面高さ(有効高さ)において、断面高さ増加によるコンクリートのCO<sub>2</sub>排出量増加と鉄筋量減少によるCO<sub>2</sub>排出量減少の関係が概ねトレードオフの最適解となった。
- (6) 今回の検討では単純桁であったが、今後の展望として他にも連続桁やラーメン構造など、複雑な構造物での検討もする必要がある。1段鉄筋配置のみの考慮であるため、力学的観点からも鉄筋量に依存することは明白であったが、2段鉄筋配置も考慮した場合の検討も必要である。
- (7) 今後、材料毎の低炭素化率によって最適設計解の変化に影響を及ぼす可能性が考えられるため、その最適案決定手法を考案する必要性も高まるだろう。

## 参考文献

- [1] 一般社団法人 セメント協会，セメント業界におけるこれまでの省エネの取組み並びに長期的展望について  
[〈https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene\\_shinene/sho\\_energy/pdf/031\\_04\\_00.pdf〉](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/pdf/031_04_00.pdf)
- [2] 経済産業省：第3回 中央環境審議会地球環境部会 中長期の気候変動対策検討小委員会 産業構造審議会産業技術環境分科会 地球環境小委員会地球温暖化対策検討ワーキンググループ 合同会合，資料3 温室効果ガス排出の現状等，2021.2  
[〈003\\_03\\_00.pdf \(meti.go.jp\)〉](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/pdf/003_03_00.pdf)
- [3] 国土交通省：カーボンニュートラルに向けた道路分野の貢献について  
[〈https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001387167.pdf〉](https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001387167.pdf)
- [4] 環境省：2050年カーボンニュートラルの実現に向けて  
[〈2050年カーボンニュートラルの実現に向けて | 地球環境・国際環境協力 | 環境省 \(env.go.jp\)〉](https://www.env.go.jp/press/press.php?lang=ja&cid=111111)
- [5] カーボンニュートラルに向けたコンクリート分野の新技术活用に関する研究小委員会 (234委員会)：コンクリート技術を活用したカーボンニュートラルの実現に向けて IV 編 CNに向けたコンクリート分野の中長期的な課題と展望，コンクリートライブラリー165，2023.10，p.145-166
- [6] 中村 董・川端 雄一郎・辰巳 大介：ケーソン式防波堤の建設時におけるCO<sub>2</sub>排出量の傾向分析と概略推定手法の検討，海洋開発論文集 Vol.38，78巻2号，2022年，p.307-312
- [7] 土木学会：土木学会コンクリート標準示方書に基づく設計計算例（鉄道構造物編）第II編 コンクリート標準示方書[施工編]の耐久性の照査を満足する設計マニュアルに基づく設計計算例—鉄道RC単純スラブ桁編—，コンクリートライブラリー118，2005.3
- [8] 土木学会：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，2004.4
- [9] kikakurui.com：日本産業規格 JIS G 3112 2020 鉄筋コンクリート用鋼
- [10] 中村 董・川端 雄一郎・辰巳 大介：港湾構造物の建設時におけるCO<sub>2</sub>排出量算定に関する基礎的検討，港湾空港技術研究所資料，No.1399，2022.3
- [11] 北陸地方整備局：設計要領[道路編] 第9章 橋梁，2022.4改訂
- [12] 中部地方整備局：道路設計要領（設計編） 第5章 橋梁，2014.3改訂
- [13] 近畿地方整備局：設計便覧（案） 第3編 道路編 第6章 橋梁上部工，2012.5
- [14] 九州地方整備局：土木工事設計要領 第III編 道路編 第2章 橋梁設計，2023.5