

(35) ライフサイクルコストによる耐食性構造部材の実用性に関する検討

木嶋 健

独立行政法人土木研究所材料資源研究グループ新材料チーム（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

E-mail:kishima@pwri.go.jp

海塩飛沫環境にある土木構造物では、耐食性に優れた構造材料の導入が、維持管理費用の縮減に効果的であると指摘されている。本稿は、耐食性材料を構造部材に用いた構造物や、耐食性材料による複合化桁を導入した構造物に対して、これらの耐食性構造部材の実用性を、ライフサイクルコストの試算結果に基づいて検討するものである。実用性の検討は、構造物のライフサイクルコストが最小となる断面構造に対して行い、鋼材を構造部材に用いた構造物を比較基準とした。単純な構造を仮定した水門や歩道橋に対する試算結果によると、耐食性材料や耐食性材料による複合化桁の実用性は、導入した土木構造物の詳細構造に大きく依存すると考えられた。

Key Words : life-cycle cost, optimization, corrosion-resistant material, composed beam, civil structure

1. はじめに

海塩飛沫環境等の厳しい腐食環境にある構造物では、耐食性に優れた構造材料の導入が、維持管理費用の縮減に効果的であると指摘されている。構造物の耐食性を確保する観点からは、耐食性材料を構造部材に用いる方法が最も効果的と考えられ、耐食性材料であるステンレス鋼、アルミニウム合金、FRPを構造部材に用いた水門や橋梁が試験的に施工されている。しかし、現時点で入手可能な耐食性材料は、材料価格が高いため、コスト面で有効な対策とならない場合もあり、構造物への広範な展開を妨げる要因になっている。一方、耐食性材料は、耐食性や材料価格が相互に異なっているため、幾つかを適切に組み合わせることにより、耐食性とコストの両面で従来材料より優位に立つことも可能であると判断される。特に、幾つかの耐食性材料を効果的に組み合わせた複合化桁は、耐食性の確保と共にコスト面でも優位な構造物の構築を可能にすると考えられる。

本稿は、耐食性材料や耐食性材料による複合化桁の実用性を、ライフサイクルコストの観点から検討するものである。対象とする構造物は、海塩飛沫環境等の厳しい腐食環境にある代表的な土木構造物である水門や歩道橋とした。主な検討項目は、①水門や歩道橋を対象に、耐

食性材料を構造部材に用いたライフサイクルコストの試算結果に基づいて、耐食性材料の実用性を検討する、②水門や歩道橋を対象に、耐食性材料を組み合わせた複合化桁を検討すると共に、複合化桁を導入したライフサイクルコストの試算結果に基づいて、複合化桁の実用性を検討する、の2点とした。

2. 耐食性材料の性質

構造部材への適用を前提とし、試算や検討の対象とした耐食性材料は、代表的な耐食性材料とされるステンレス鋼の他、アルミニウム合金、チタン合金、有機系材料であるFRPの4種類である。

(1) 材料特性

(a) ステンレス鋼：土木構造部材に用いるステンレス鋼¹⁾は、SUS304が一般的とされている。SUS304は、淡水環境では耐食性が高いものの、海塩飛沫環境では耐食性が低下する場合もあると指摘されている。発錆による腐食は、腐食速度が小さく、耐食性に影響しないが、すき間腐食や孔食は、耐食性の低下に大きく影響するとされている。材料価格は、鋼材のSS400に比べて極めて高いため、構造物のライフサイクルコストを評価する場合に

は、これを十分に考慮することが必要である。

(b) アルミニウム合金：土木構造部材に用いるアルミニウム合金²⁾は、耐食性の確保を目的とする場合には、A5083Pが一般的とされている。A5083Pは、SUS304と同様に、淡水環境では耐食性が高いものの、海塩飛沫環境では、すき間腐食や孔食により、耐食性が低下する場合もあるとされている。ただし、A5083Pの耐食性は、自然電位がSUS304より卑であることを考慮すると、一般的にSUS304より低いと考えられる。また、弾性率や強度もSS400やSUS304より低く、構造物の設計自由度が制約される点に留意しておく必要がある。さらに、材料価格もSS400に比べて高いため、構造物のライフサイクルコストを評価する場合には、これを十分に考慮することが必要である。

(c) チタン合金：土木構造材料に用いるチタン合金は、純チタンが一般的とされている。純チタンは、淡水環境と海塩飛沫環境の両方で耐食性が高く、一般的にはメンテナンスフリーと考えられている。また、SS400と比較すると、弾性率はほぼ半分であるが、強度はほぼ同等であるため、構造物の設計自由度はアルミニウム合金より高いと考えられる。しかし、材料価格は、SS400だけでなく、SUS304やA5083Pに比べても極めて高く、構造物のライフサイクルコストを評価する場合には、これを十分に考慮することが必要である。

(d) FRP：土木構造材料に用いるFRPは、相対的に材料価格の低いGFRPが一般的とされている。GFRPは、純チタンと同様に、淡水環境と海塩飛沫環境の両方で耐食性が高い。また、表面に適切な塗装を施した場合には、純チタンと同様に、ほぼメンテナンスフリーになると考えられている。一方、SS400と比較すると、強度はほぼ同等であるが、弾性率が極めて低いため、構造物の設計自由度は大きく低下する。さらに、材料価格も、純チタンよりは低いが、SS400やA5083Pより高く、構造物のライフサイクルコストを評価する場合には、これを十分に考慮することが必要である。

(2) 材料価格

表-1(a)は、構造部材に用いる耐食性材料の弾性率や強度および材料価格を、従来材料である鋼材のSS400³⁾と併せて示したものである。なお、TP340は、純チタンの板材であり、構造部材用途では一般的とされている。耐食性材料やSS400の価格は、基本的に建設物価⁴⁾や建設積算資料⁵⁾等で公表された構造部材の価格を参考に設定した。また、構造部材の価格は、部材形状で大きく異なるが、最も一般的と考えられる平板材を基本とした。なお、これらの資料に記載のない耐食性材料の価格は、内部資料⁶⁾や市場価格を参考に設定した。

一方、構造部材への適用を前提とした材料の価格は、構造物の使用性を評価する観点からは、体積当たりの価格が指標として有効と考えられる。耐食性材料は、弾性率が比較的低く、SS400に比べて使用性が問題となる構造物も多くなると想定される。表-1(b)は、この様な点も考慮し、海塩飛沫環境等の厳しい腐食環境での使用を前提として、耐食性材料やSS400の性質を定性的に比較したものである。

3. ライフサイクルコストの最適化

土木構造物のライフサイクルコストは、材料費と施工費に大別できる。この中で、施工費は、土木構造物の設置条件により大きく変化し、標準的な費用を設定することが困難と考えられる。そのため、ライフサイクルコストの試算は、施工費を除外し、材料費のみを考慮した。一方、土木構造物を設計する場合には、多数の構成部位に対して、安全性や使用性を照査することが必要となる。ここでは、試算の標準化と簡略化を図るため、対象とする水門や歩道橋をプレートガーダー形式に限定し、安全性や使用性を照査する構成部位は、重要な設計要素である主桁のみとした。また、照査に用いる設計法は、現時点で多用されている許容応力度設計法とした。

ライフサイクルコストの最適化は、主桁本数と主桁高を変数とした式(1a)、(1b)～(4)に基づいて実施し、海塩飛沫環境等の厳しい腐食環境にある水門や歩道橋を対象とした。目的関数はライフサイクルコストの最小化、制約条件は主桁の活荷重たわみ、曲げ応力およびせん断応力である。なお、主桁の横倒れ座屈や局部圧縮座屈、せん断座屈は、試算を簡略化するため考慮していない。記号

表-1 耐食性材料の性質

(a) 材料物性と価格

	弾性率 (N/mm ²)	強度* (N/mm ²)	価格 (千円/t) (千円/m ³)	
SS400	200,000	235	60	500
SUS304	193,000	235	300	2,400
A5083P	72,000	125	600	1,650
TP340	106,000	215	3,000	13,500
GFRP	27,000	350	-	2,000

*) 金属材料は降伏強度、GFRPは最大強度。

(b) 海塩飛沫環境等の厳しい腐食環境での定性的比較

	耐食性	弾性率	強度	価格
SS400	×	◎	◎	◎
SUS304	△	◎	◎	△
A5083P	△	△	○	△
TP340	◎	○	○	×
GFRP	○	×	◎	△

(優れる) ◎←○←△←× (劣る)

は、LCCがライフサイクルコスト、ICが初期費用、 n が主桁本数、 h が主桁高、 δ_a が活荷重たわみの制限値、 σ_a が許容引張応力度あるいは圧縮応力度、 τ_a が許容せん断応力度である。活荷重たわみの制限値 δ_a は、主桁長の1/400とした。また、主桁本数は2本以上とし、主桁高は自由に設定できるものとした。

①目的関数

$$LCC = IC + \sum_{i \leq N_T} \{[C^{rc}S(h)]_{beam} + [C^{rc}S(h)]_{others}\}_i \rightarrow \min \quad \dots(1a)$$

$$IC = n \times \{[C^m V(h)]_{beam} + [C^{ic}S(h)]_{beam}\} + [C^m V(h)]_{others} + [C^{ic}S(h)]_{others} \quad \dots(1b)$$

ここで、 $[\cdot]_{beam}$ ：主桁項、 $[\cdot]_{others}$ ：主桁以外の項、 V ：体積、 S ：表面積、 C^m ：単位体積当たりの材料価格、 C^k ：単位表面積当たりの初期塗装費、 C^{rc} ：単位表面積当たりの再塗装費、 N_T ：ライフサイクル期間中の塗装回数、である。

②制約条件

a)活荷重たわみ

$$n \geq \frac{1}{\delta_a} \times \frac{5}{384} Q L^4 \times \frac{1}{[EI(h)]_{beam}} \quad \dots\dots(2)$$

b)曲げ応力

$$n \geq \frac{1}{\sigma_a} \times \frac{1}{8} Q L^2 \times \frac{[E h_n(h)]_{beam}^{edge}}{[EI(h)]_{beam}} \quad \dots\dots(3)$$

c)せん断応力

$$n \geq \frac{1}{\tau_a} \times \frac{1}{2} Q L \times \frac{1}{[S_{web}(h)]_{beam}} \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 $[\cdot]_{beam}^{edge}$ ：主桁上下端の項、 Q ：構造物の単位長当たり載荷重、 L ：主桁長、 E ：弾性率、 h_n ：中立軸から主桁上下端までの距離、 EI ：曲げ剛性、である。

従来材料のSS400は、淡水環境と海塩飛沫環境の別なく腐食するため、一般的には防食塗装で耐食性を確保している。そのため、SS400を構造部材に用いた場合には、ライフサイクル期間中の塗装費を考慮した。防食塗料⁷⁾は、塩化物イオンの影響を受けない一般環境で用いられる一般塗料系（油性さび止め+フタル酸樹脂塗料）と塩化物イオンの影響を強く受ける厳しい腐食環境で用いられる重防食塗料系（厚膜形ジンクリッチペイント+エポ

表-2 試算で用いた施工費以外の塗装費⁷⁾

	初期塗装 (円/m ²)	再塗装 (円/m ²)
一般塗装	3,300	2,100
重防食塗装	7,200	2,000

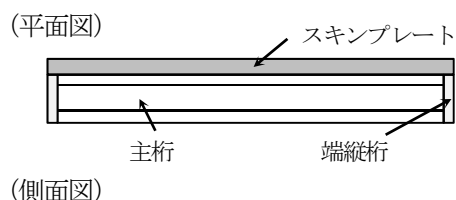


図-1 扉体の断面（主桁が2本の場合）⁸⁾

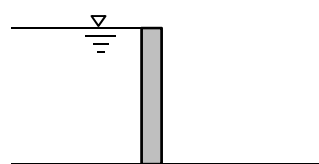


図-2 扉体の設計荷重

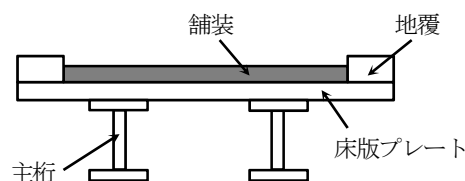


図-3 歩道橋の断面⁹⁾

キシ樹脂塗料+ポリウレタン樹脂）に大別される。防食塗料の適切な塗替え間隔は、一般環境では、一般塗料系が10年程度、重防食塗料系が30年程度、海塩飛沫環境等の厳しい腐食環境では、重防食塗料系が20年程度と考えられている。そのため、海塩飛沫環境等の厳しい腐食環境にある土木構造物に対しては、塗装間隔を、一般塗装で10年、重防食塗装で20年と設定した。表-2は、試算で用いた施工費以外の塗装費を、初期塗装時と再塗装時、一般塗装と重防食塗装の別に示したものである。

(1) 水門

水門を設計する場合には、扉体や戸当たり、開閉装置等を考慮することが必要である。そこで、ライフサイクルコストの試算は、重要な構成要素である扉体のみを対象とした。扉体は、できる限り単純な構造を仮定し、主桁、2本の端縦桁およびスキンプレートで構成されるプレートガーダー形式とした⁸⁾。図-1に扉体の断面を示す。

主桁は、桁高以外の諸元であるフランジ幅やフランジ厚、ウェブ厚を一定値とし、端縦桁は、ウェブのみを考

慮した主桁に諸元を一致させた。スキンプレートは、厚さが一定の板材であり、幅と高さが扉体と一致している。設計荷重は、図-2に示す通りであり、水位が扉体の高さと同じとする静水圧荷重を片側のみに載荷した。

(2) 歩道橋

歩道橋を設計する場合には、上部工や下部工を考慮することが必要である。そこで、ライフサイクルコストの試算は、重要な構成要素である上部工のみを対象とした。上部工は、できる限り単純な構造を仮定し、主桁、床版プレート、舗装および地覆で構成されるプレートガーダー形式とした⁹⁾。図-3に歩道橋の断面を示す。

主桁は、水門の扉体と同様に、桁高以外の諸元であるフランジ幅やフランジ厚、ウェブ厚を一定値とした。床版プレートは、厚さが一定の板材であり、幅と長さが歩道橋と一致している。設計荷重は、複合構造物¹⁰⁾や歩道橋の設計基準¹¹⁾にしたがい、舗装に載荷される 3.5kN/m^2 の活荷重や自重とした。なお、舗装はアスファルト、地覆はCチャンネル形のGFRPで構成されるものとした。

4. 耐食性材料の実用性

構造部材に用いた材料は、表-1(a)に示した耐食性材料および従来材料のSS400である。材料の弾性率および引張強度は表-1(a)の数値を用い、圧縮強度は引張強度に一致するものとした。せん断強度は引張強度の $1/\sqrt{3}$ としている。材料の安全率は、金属材料で2、GFRPで3とした。一方、構造部材は、一般的に少数の規格品が市場に流通しており、規格品以外の価格はこれより高くなると考えられる。しかし、試算で用いた材料の価格は、計算の簡略化を図るため、平板材に基づく表-1(a)の数値とし、規格による影響は無視した。

(1) 水門

試算で用いる式(1a), (1b)~(4)に含まれる各項は、式(5)で与えられる。ここで、 H, L は扉体の高さと幅、 t_s はス

$$\begin{aligned} [C^m V(h)]_{\text{beam}} &= C^m \cdot \{2t_f(b-w) + wh\}L \\ [C^m V(h)]_{\text{others}} &= C^m \cdot (2wh + t_s L)H \\ [C^{ic} S(h)]_{\text{beam}} &= C^{ic} \cdot 2(b-w+h)L \\ [C^{ic} S(h)]_{\text{others}} &= C^{ic} \cdot 2[(t_s + H)L + (t_s + 2h)H \\ &\quad - 2n\{t_f(b-w) + wh\}] \\ [EI(h)]_{\text{beam}} &= \frac{1}{12} E^{\text{beam}} \{bh^3 - (b-w)(h-2t_f)^3\} \\ [Eh_n(h)]_{\text{beam}}^{\text{edge}} &= \frac{1}{2} E^{\text{beam}} h \\ [S^{\text{web}}(h)]_{\text{beam}} &= w(h-2t_f) \end{aligned} \quad \dots \dots (5)$$

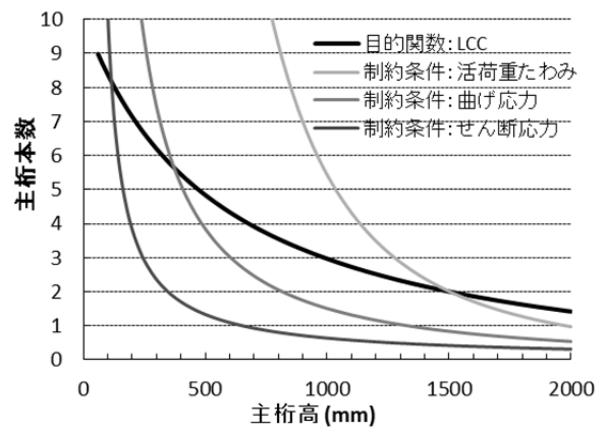


図-4 GFRPを構造部材に用いた扉体の目的関数と制約条件

キンプレートの厚さ、 b, t_f, w は、主桁フランジ幅、主桁上下のフランジ厚、ウェブ幅を示している。

図-4は、GFRPを構造部材に用いた高さ5m、幅10mの扉体に対して、主桁フランジ幅が300mm、フランジ厚とウェブ厚が20mmの場合に、目的関数と制約条件との関係を示したものである。図-4では、活荷重たわみ、曲げ応力、せん断応力の各制約条件に対する実行可能領域は、各々に対応する曲線の右上方領域で示される。したがって、主桁本数と主桁高の実行可能領域は、各制約条件に対する実行可能領域の共通部分となる。一方、目的関数に対応する曲線は、曲線上ではライフサイクルコストが一致し、右上方へ移動するほどライフサイクルコストが高くなる。この場合には、ライフサイクルコストが最小となる主桁本数は、整数となることを考慮すると、2本であることが確認される。これは、適用した材料や土木構造物の種類によらず、試算した全てのケースで成立しており、主桁本数が少ないほどライフサイクルコストが低くなることを示唆している。

ライフサイクルコストの試算は、期間を100年とし、扉体の高さを変化させた。高さを変化させた試算は、幅が10m、高さが2.5, 5, 7.5, 10mの4ケース、幅を変化させた試算は、高さが5m、幅が5, 7.5, 10, 12.5, 15mの5ケースとした。構成部位の諸元は、主桁フランジ幅が300mm、フランジ厚とウェブ幅が20mm、スキンプレートの厚さが10mmである。

表-3は、扉体の高さを変化させたライフサイクルコストの試算結果を、主桁高や制約条件と併せて示したものである。これによると、対弾性率比での許容応力度が相対的に低いGFRP以外の材料では、高さの増加により、制約条件が活荷重たわみから曲げ応力へと移行している。一方、主桁の単位長当たり載荷重は、主桁本数が変化しないため、高さと共に増大する。これは、式(2), (3)も考慮すると、対弾性率比での許容応力度が相対的に低い材料や主桁の単位長当たり載荷重が大きい場合には、制約

条件が活荷重たわみよりも曲げ応力となる可能性が高くなることを示唆している。

図-5(a)は、SS400を構造部材に用いた扉体の費用構成を示したものである。これによると、塗装費の割合が圧倒的に高く、ライフサイクルコストの80%以上を占めることが確認される。これは、耐食性材料を構造部材に用いた場合には、ライフサイクルコストが大きく改善され

る可能性を示している。図-5(b)は、耐食性材料を構造部材に用いた扉体のライフサイクルコストを、SS400を構造部材に用いた扉体のライフサイクルコストを基準として示したものである。これによると、TP340以外の耐食性材料では、全般的にライフサイクルコストがSS400より低く、高い塗装費の割合がライフサイクルコストの改善に寄与したことを示唆している。

表3 扉体の高さをパラメータとした試算結果
(単位：百万円)

高さ 材料	2.5m	5m	7.5m	10m
SS400	1.69 (360)	3.36 (810)	5.49 (1,430)	7.96 (2,090)
SUS304	1.58 (360)	2.91 (810)	4.75 (1,430)	6.96 (2,090)
A5083P	1.24 (560)	2.45 (1,270)	4.11 (2,170)	6.11 (3,100)
TP340	9.60 (470)	16.8 (870)	27.5 (1,520)	40.4 (2,210)
GFRP	1.80 (850)	3.25 (1,500)	4.85 (2,070)	6.59 (2,590)

- ・カッコ内の数値は主桁高 (単位：mm)
- ・無色の背景色は活荷重たわみが制約条件となる場合、灰色の背景色は曲げ応力が制約条件となる場合。

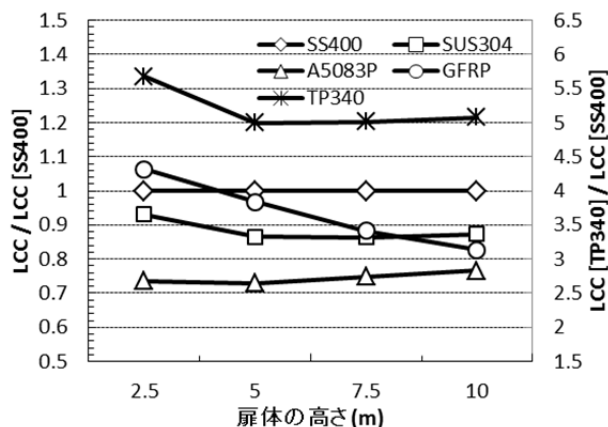
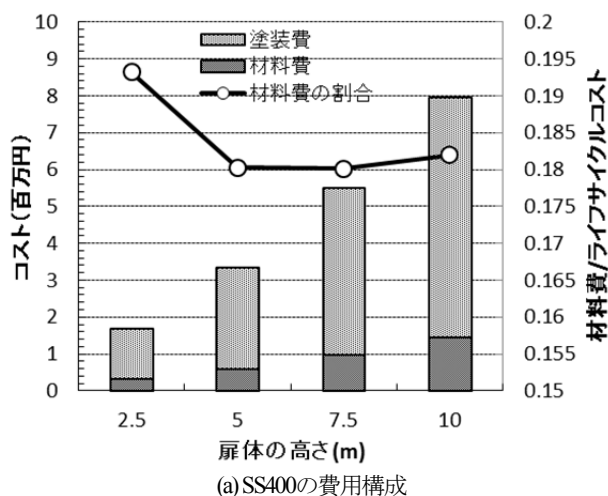


図-5 扉体の高さをパラメータとした試算結果

表4 扉体の幅をパラメータとした試算結果
(単位：百万円)

幅 材料	5m	7.5m	10m	12.5m	15m
SS400	1.39 (280)	2.30 (530)	3.36 (810)	4.58 (1,120)	5.96 (1,430)
SUS304	1.14 (280)	1.94 (530)	2.91 (810)	4.05 (1,120)	5.36 (1,430)
A5083P	0.901 (460)	1.59 (850)	2.45 (1,270)	3.47 (1,710)	4.65 (2,170)
TP340	6.78 (350)	11.3 (590)	16.8 (870)	23.4 (1,190)	31.1 (1,520)
GFRP	1.23 (630)	2.14 (1,060)	3.25 (1,500)	4.55 (1,960)	6.05 (2,420)

- ・カッコ内の数値は主桁高 (単位：mm)
- ・無色の背景色は活荷重たわみが制約条件となる場合、灰色の背景色は曲げ応力が制約条件となる場合。

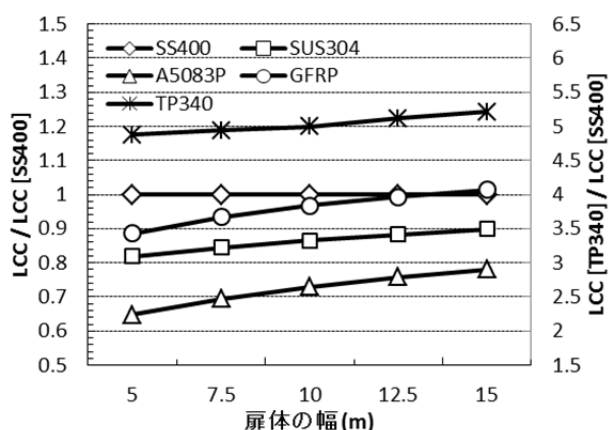
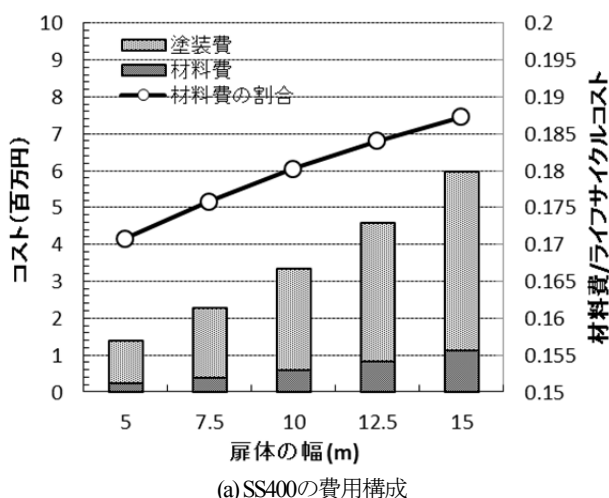


図-6 扉体の幅をパラメータとした試算結果

一方、SS400を基準としたライフサイクルコストは、GFRP以外の耐食性材料では同様の傾向にあり、材料費の割合にほぼ追従している。これは、制約条件がライフサイクルコストの特性にそのまま反映されたことを示している。制約条件が曲げ応力となる場合には、許容応力度が比較的近いA5083P以外の材料では主桁高がほぼ一致し、許容応力度が相対的に低いA5083Pでは主桁高がこれより高くなる。そのため、制約条件が曲げ応力となる場合には、SS400を基準としたA5083Pのライフサイクルコストは、高さと共に相対的に上昇すると考えられ、試算結果とも比較的良好に整合することが確認される。また、SS400を基準としたGFRPのライフサイクルコストは、高さの増加と共に低下している。これは、主桁の単位長当たり載荷重が増加する場合には、曲げ応力を制約条件とする主桁高が、活荷重たわみを制約条件とする主桁高に比べて大きく増加することを示唆している。

表-4は、扉体の幅を変化させたライフサイクルコストの試算結果を、主桁高や制約条件と併せて示したものである。これによると、制約条件は、TP340が活荷重たわみから曲げ応力へと移行するが、GFRPが活荷重たわみ、それ以外の材料が曲げ応力であり、対弾性率比での許容応力度の相対関係がほぼ反映されている。一方、主桁の単位長当たり載荷重は、主桁本数が変化しないため、主桁長によらず一定となる。これは、式(2)、(3)やTP340の制約条件を考慮すると、主桁長が増加する場合には、制約条件が活荷重たわみから曲げ応力へと移行する可能性が高くなることを示唆している。

図-6(a)は、SS400を構造部材に用いた扉体の費用構成を示したものである。これによると、高さの場合と同様に、塗装費がライフサイクルコストの80%以上を占めることが確認される。図-6(b)は、耐食性材料を構造部材に用いた扉体のライフサイクルコストを、SS400を構造部材に用いた扉体のライフサイクルコストを基準として示したものである。これによると、TP340以外の耐食性材料では、全般的にライフサイクルコストがSS400より低く、高さの場合と同様に、高い塗装費の割合が改善につながったことを示唆している。一方、SS400を基準としたライフサイクルコストは、GFRPを含む全ての耐食性材料で幅と共に増加する傾向にあり、材料費の割合にほぼ追従している。これは、主桁長が増加する場合には、曲げ応力を制約条件とする主桁高が、活荷重たわみを制約条件とする主桁高より増加するものの、主桁の単位長当たり載荷重が増加する場合に比べて小さくなることを示唆している。

(2) 歩道橋

試算で用いる式(1a)、(1b)～(4)に含まれる各項は、扉体

の高さを歩道橋の幅員、扉体の幅を歩道橋の橋長とすると、大部分の項が式(5)と一致する。式(5)と異なる項を式(6)に示す。ここで、 W, L は歩道橋の幅員と橋長、 t_d は床版プレートの厚さ、 t_{sb} は舗装厚、 t_{db} 、 V^{db} は地覆幅とその体積である。

$$\begin{aligned} [C^m V(h)]_{others} &= C^{As} \cdot t_{As}(W - 2t_{sb})L \\ &\quad + C^{GF} \cdot 2V^{sb}t_{sb}L \\ [C^{ic} S(h)]_{others} &= C^{ic} \cdot \{WL + 2t_d(W + L)\} \quad \cdots (6) \end{aligned}$$

ライフサイクルコストの試算は、期間を100年とし、歩道橋の幅員と橋長を変化させた。幅員を変化させた試算は、橋長が20m、幅員が2, 4, 6, 8mの4ケース、橋長を変化させた試算は、幅員が2m、橋長が10, 12.5, 15, 17.5, 20mの5ケースとした。構成部位の諸元は、主桁が扉体の主桁と一致する他、床版プレートの厚さが10mm、舗装厚が30mm、地覆幅が250mmである。

表-5は、歩道橋の幅員を変化させたライフサイクルコストの試算結果を、主桁高や制約条件と併せて示したものである。これによると、制約条件は、GFRPとTP340が活荷重たわみ、それ以外の材料が活荷重たわみから曲げ応力へと移行しており、対弾性率比での許容応力度の相対関係がほぼ反映される結果となっている。また、主桁の単位長当たり載荷重は、主桁本数が変化しないため、幅員と共に増加する。これは、扉体の高さと同様に、対弾性率比での許容応力度が相対的に低い材料や主桁の単位長当たり載荷重が大きい場合には、制約条件が活荷重たわみより曲げ応力となる可能性が高くなることを示唆している。

図-7(a)は、SS400を構造部材に用いた歩道橋の費用構成を示したものである。これによると、塗装費は材料費を上回るものの、ライフサイクルコストの60～70%程度であり、扉体に比べて割合が低下している。歩道橋では、主桁と床版プレートの下面を塗装箇所とするが、扉体では、主桁、端縦桁およびスキンプレートの両面を塗装箇所とする。これは、歩道橋の塗装費が、扉体に比べて、ライフサイクルコストに占める割合を低下させた大きな要因であると推察される。この場合には、耐食性材料の導入によるライフサイクルコストの改善は、扉体に比べて縮小すると考えられる。

図-7(b)は、耐食性材料を構造部材に用いた歩道橋のライフサイクルコストを、SS400を構造部材に用いた歩道橋のライフサイクルコストを基準として示したものである。これによると、A5083P以外の耐食性材料では、ライフサイクルコストがSS400より高く、耐食性材料の導入がライフサイクルコストの改善に寄与していない。これは、耐食性材料の導入による効果が、土木構造物の詳細

細構造に大きく依存することを示唆するものである。また、SS400を基準としたライフサイクルコストは、GFRPでは幅員と共に大きく低下するが、GFRP以外の耐食性材料では低下が小さく、材料費の割合にほぼ追従している。これは、扉体の高さを変化させたケースと同様であり、主桁の単位長当たり載荷重が増加する場合には、曲げ応力を制約条件とする主桁高が、活荷重たわみを制約

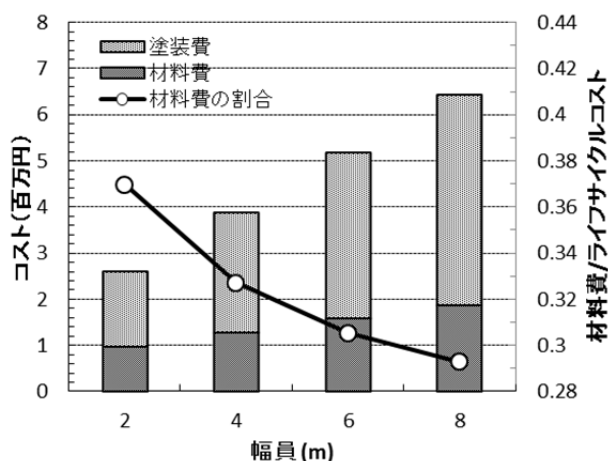
条件とする主桁高に比べて大きく増加することを示唆している。

表-6は、歩道橋の橋長を変化させたライフサイクルコストの試算結果を、主桁高や制約条件と併せて示したものである。これによると、制約条件は、全ての材料で活荷重たわみである。SS400の制約条件が活荷重たわみである場合には、対弾性率比での許容応力度を考慮すると、

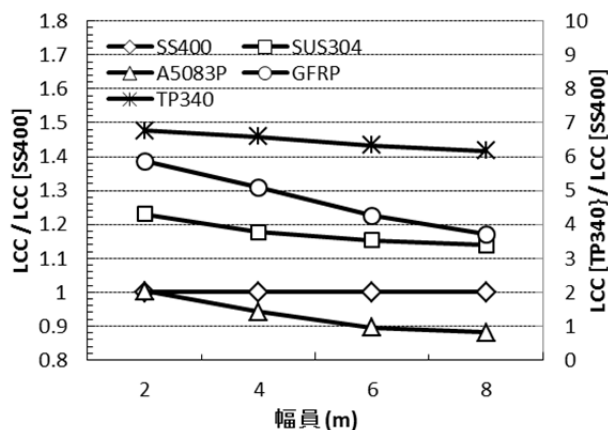
表-5 歩道橋の幅員をパラメータとした試算結果
(単位：百万円)

材料	2m	4m	6m	8m
SS400	2.61 (410)	3.89 (620)	5.18 (830)	6.43 (1,020)
SUS304	3.22 (420)	4.59 (620)	5.98 (830)	7.32 (1,020)
A5083P	2.62 (640)	3.67 (920)	4.65 (1,140)	5.67 (1,390)
TP340	17.7 (540)	25.7 (780)	32.9 (940)	39.7 (1,070)
GFRP	3.63 (970)	5.10 (1,370)	6.36 (1,650)	7.53 (1,860)

- ・カッコ内の数値は主桁高 (単位：mm)
- ・無色の背景色は活荷重たわみが制約条件となる場合、灰色の背景色は曲げ応力が制約条件となる場合。



(a) SS400の費用構成



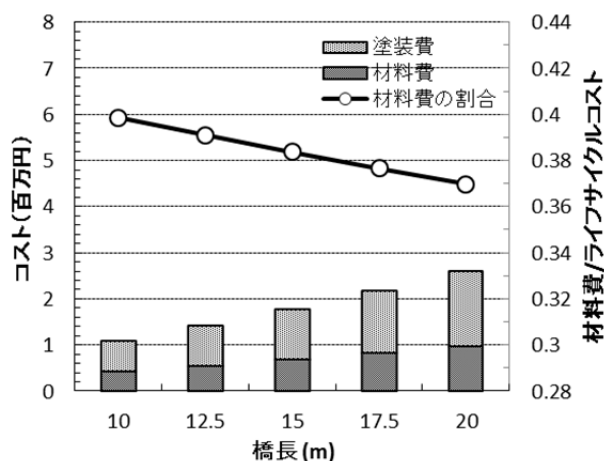
(b) SS400を基準としたライフサイクルコスト

図-7 歩道橋の幅員をパラメータとした試算結果

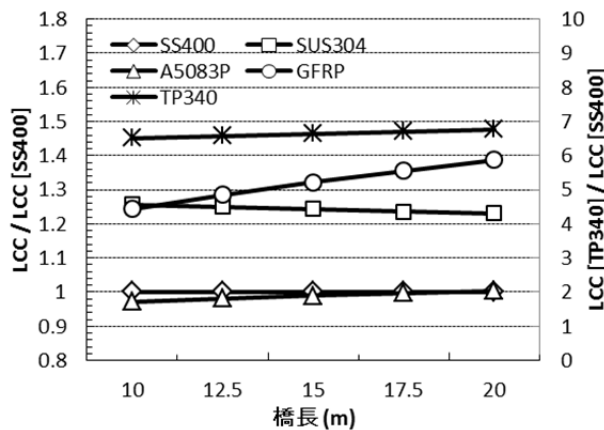
表-6 歩道橋の橋長をパラメータとした試算結果
(単位：百万円)

材料	10m	12.5m	15m	17.5m	20m
SS400	1.09 (170)	1.42 (220)	1.79 (280)	2.18 (350)	2.61 (410)
SUS304	1.37 (170)	1.78 (230)	2.22 (290)	2.70 (350)	3.22 (420)
A5083P	1.06 (260)	1.40 (350)	1.77 (440)	2.18 (540)	2.62 (640)
TP340	7.10 (220)	9.37 (290)	11.9 (370)	14.7 (460)	17.7 (540)
GFRP	1.36 (400)	1.83 (530)	2.36 (670)	2.96 (820)	3.63 (970)

- ・カッコ内の数値は主桁高 (単位：mm)



(a) SS400の費用構成



(b) SS400を基準としたライフサイクルコスト

図-8 歩道橋の橋長をパラメータとした試算結果

耐食性材料の制約条件も活荷重たわみになると考えられる。制約条件が活荷重たわみで一致する場合には、弾性率が低い耐食性材料は、SS400を基準とした主桁高が高くなると推察される。

図-8(a)は、SS400を構造部材に用いた歩道橋の費用構成を示したものである。これによると、塗装費はライフサイクルコストの60%程度であり、扉体に比べて低いことが確認される。図-8(b)は、耐食性材料を構造部材に用いた歩道橋のライフサイクルコストを、SS400を構造部材に用いた歩道橋のライフサイクルコストを基準として示したものである。これによると、A5083PはSS400とほぼ同等であるが、それ以外の耐食性材料はSS400より高く、耐食性材料の導入がライフサイクルコストの改善に寄与していない。一方、SS400を基準としたライフサイクルコストは、耐食性材料により異なる傾向を示している。SUS304は橋長の増加と共に減少し、塗装費の割合にほぼ追従するが、A5083PとGFRPは橋長と共に増加し、塗装費の割合とは逆の傾向にある。これは、SS400の材料費に占める主桁の割合が橋長と共に増加するためと考えられ、弾性率の低いA5083PやGFRPでは、SS400を基準としたライフサイクルコストの上昇につながったと推察される。

5. 耐食性材料による複合化桁の実用性

耐食性材料による複合化桁を構築する場合には、適用される環境や腐食部位を考慮することが重要である。海塩飛沫環境等の厳しい腐食環境では、SS400を構造部材に用いた水門や橋梁で腐食が生じやすい部位は、水分が滞留しやすい箇所であり、構造や形状が複雑な主桁や補助桁の隅角部と考えられている。したがって、耐食性材料を水門や歩道橋に導入する場合には、このような腐食部位に優先的に適用することが重要と考えられる。

海塩飛沫環境等の厳しい腐食環境において、耐食性が高く、比較の実用レベルにある耐食性材料は、これまでの検討結果を考慮すると、GFRPと考えられる。一方、4章で得られた試算結果によると、GFRPは、活荷重たわみが制約条件となるため、ライフサイクルコストを縮減するためには、曲げ剛性の改善により使用量を削減することが重要となる。この場合には、形状が複雑な主桁本

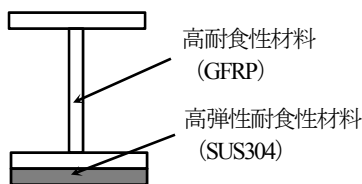


図-9 耐食性材料による複合化桁

体に高耐食性材料のGFRPを、形状が比較的単純な主桁フランジ下端に高弾性耐食性材料のSUS304を適用した図-9の複合化桁が有力な対応策になると考えられる。そこで、ライフサイクルコストの試算では、主桁にGFRPとSUS304との複合化桁を用いた。なお、GFRPとSUS304との接合部の強度は、不明な点が多いため、制約条件として適用しないこととした。

(1) 水門

試算で用いる式(1a), (1b)~(4)に含まれる各項は、式(7)で与えられる。式(7)で用いられる記号は、 h をGFRP部の桁高とする以外は、式(5)と一致している。また、 t_p はSUS304の板厚、 h_n^u, h_n^l は中立軸から複合化桁上端あるいは下端までの距離、添字のGFはGFRP、SUSはSUS304を示している。

$$[C^m V(h)]_{beam} = C^{GF} \{2t_f(b-w) + wh\}L + C^{SUS} t_p b L$$

$$[C^m V(h)]_{others} = C^{GF} \{2wh + t_s L\}H$$

$$[EI(h)]_{beam} = \frac{1}{6} E^{GF} b t_f^3 + \frac{1}{2} E^{GF} b t_f (h - t_f)^2$$

$$+ \frac{1}{12} E^{GF} w (h - t_f)^3 + \frac{1}{4} E^{SUS} b t_p (h + t_p)^2$$

$$+ \frac{1}{12} E^{SUS} b t_p^3 - \frac{1}{4} \frac{E^{SUS} b t_p (h + t_p)^2}{E^{GF} \{2t_f(b-w) + wh\}L + E^{SUS} t_p b L}$$

$$\frac{1}{\sigma_a} \cdot [E h_n(h)]_{beam}^{edge} \stackrel{\text{def}}{=} \max \left\{ \frac{E^{GF} h_n^u(h)}{\sigma_a^{GF}}, \frac{E^{SUS} h_n^l(h)}{\sigma_a^{SUS}} \right\}$$

$$\begin{cases} E^{GF} h_n^u(h) = \frac{1}{2} E^{GF} \left\{ h + \frac{E^{SUS} b t_p (h + t_p)}{E^{GF} \{2t_f(b-w) + wh\}L + E^{SUS} t_p b L} \right\} \\ E^{SUS} h_n^l(h) = \frac{1}{2} E^{SUS} \left\{ h - \frac{E^{SUS} b t_p (h + t_p)}{E^{GF} \{2t_f(b-w) + wh\}L + E^{SUS} t_p b L} \right\} \end{cases}$$

$$[S^{web}(h)]_{beam} = w(h - 2t_f)$$

..... (7)

ライフサイクルコストの試算は、期間を100年とし、扉体の高さや幅を変化させた。試算ケースは、4(1)項で設定したケースと一致させた。構成部位の諸元は、主桁に用いた複合化桁のGFRP部が、4章で設定した主桁と一致する他、複合化桁のSUS304部の板厚が20mm、スキンプレーットの厚さが10mmである。

表-7は、扉体の高さを変化させたライフサイクルコストの試算結果を、主桁高や制約条件と併せて示したものである。表には、4(1)項で得られたSS400やGFRPの試算結果も示している。これによると、複合化桁の制約条件は、GFRPとは異なり、高さの増加に伴い活荷重たわみからSUS304部の曲げ応力へと移行している。これは、SUS304との複合化が、曲げ剛性の改善による活荷重たわみの低減につながるものの、GFRPとほぼ同等の許容

表-7 扉体の高さをパラメータとした試算結果
(単位：百万円)

高さ 材料	2.5m	5m	7.5m	10m
SS400	1.69 (360)	3.36 (810)	5.49 (1,430)	7.96 (2,090)
GFRP	1.80 (850)	3.25 (1,500)	4.85 (2,070)	6.59 (2,590)
複合化桁	1.86 (640)	3.11* (1,170*)	5.57* (2,400*)	8.90* (3,880*)

- ・カッコ内の数値は主桁高 (単位：mm)
- ・無色の背景色は活荷重たわみが制約条件となる場合、灰色の背景色は曲げ応力が制約条件となる場合、記号*はSUS304部の曲げ応力が制約条件となる場合。

表-8 扉体の幅をパラメータとした試算結果
(単位：百万円)

幅 材料	5m	7.5m	10m	12.5m	15m
SS400	1.39 (280)	2.30 (530)	3.36 (810)	4.58 (1,120)	5.96 (1,430)
GFRP	1.23 (630)	2.14 (1,060)	3.25 (1,500)	4.55 (1,960)	6.05 (2,420)
複合化桁	1.23 (480)	2.08 (800)	3.11* (1,170*)	4.58* (1,740*)	6.41* (2,400*)

- ・カッコ内の数値は主桁高 (単位：mm)
- ・無色の背景色は活荷重たわみが制約条件となる場合、灰色の背景色は曲げ応力が制約条件となる場合、記号*はSUS304部の曲げ応力が制約条件となる場合。

応力度で、GFRPより高い弾性率を持つSUS304の曲げ応力が新たな制約条件となることを示している。また、複合化桁の桁高は、制約条件がSUS304部の曲げ応力となる場合にGFRPより高くなる傾向にあり、複合化による改善効果が制約条件の移行で縮小・消滅すると考えられる。一方、ライフサイクルコストは、制約条件が活荷重たわみからSUS304部の曲げ応力へと移行した場合に最も改善されている。これは、曲げ剛性の改善による活荷重たわみの低減が効果的となる場合にライフサイクルコストも大きく改善することを示すものであり、曲げ剛性の改善が重要となる場合には、複合化桁の導入が効果的であることを示唆している。

表-8は、扉体の幅を変化させたライフサイクルコストの試算結果を、主桁高や制約条件と併せて示したものである。これによると、制約条件は、高さの場合と同様に、幅の増加に伴い活荷重たわみからSUS304部の曲げ応力へと移行している。また、複合化桁の桁高はGFRPより低いが、制約条件がSUS304部の曲げ応力となる場合には、その差が縮小している。これは、複合化による改善効果が、高さの場合と同様に、制約条件の移行で縮小することを示している。一方、ライフサイクルコストは、制約条件が活荷重たわみからSUS304部の曲げ応力へと移行した場合に最も改善されており、曲げ剛性の改善が

重要となる場合には、複合化桁の導入が効果的であることを示唆している。

(2) 歩道橋

試算で用いる式(1a), (1b)~(4)に含まれる各項は、扉体の高さを歩道橋の幅員、扉体の幅を歩道橋の橋長とすると、大部分の項が式(7)と一致する。式(7)と異なる項は、 $[C^m V(h)]_{others}$ であり、式(6)の当該項と一致する。

ライフサイクルコストの試算は、期間を100年とし、歩道橋の幅員と橋長を変化させた。試算ケースは、4(2)項で設定したケースと一致させた。構成部位の諸元は、主桁に用いた複合化桁が扉体の複合化桁と一致する他、床版プレートの厚さが10mm、舗装厚が30mm、地覆幅が250mmである。

表-9は、歩道橋の幅員を変化させたライフサイクルコストの試算結果を、主桁高や制約条件と併せて示したものである。表には、4(2)項で得られたSS400やGFRPの試算結果も示している。これによると、複合化桁の制約条件は、GFRPと一致し、幅員によらず活荷重たわみである。これは、複合化による改善効果が最も現れる状況であることを示している。また、ライフサイクルコストは、幅員の増加と共にGFRPに比べて低下し、その低下量も増大する傾向にある。一方、主桁の単位長あたり載荷重は、耐食性材料の場合と同様に、全ての試算ケースで最小化時の主桁本数が2本となるため、幅員と共に増加する。この場合には、活荷重たわみの制限値がGFRPの桁

表-9 歩道橋の幅員をパラメータとした試算結果
(単位：百万円)

幅員 材料	2m	4m	6m	8m
SS400	2.61 (410)	3.89 (620)	5.18 (830)	6.43 (1,020)
GFRP	3.63 (970)	5.10 (1,370)	6.36 (1,650)	7.53 (1,860)
複合化桁	3.79 (730)	5.10 (1,040)	6.27 (1,250)	7.36 (1,420)

- ・カッコ内の数値は主桁高 (単位：mm)
- ・無色の背景色は活荷重たわみが制約条件となる場合、灰色の背景色は曲げ応力が制約条件となる場合。

表-10 歩道橋の橋長をパラメータとした試算結果
(単位：百万円)

橋長 材料	10m	12.5m	15m	17.5m	20m
SS400	1.09 (170)	1.42 (220)	1.79 (280)	2.18 (350)	2.61 (410)
GFRP	1.36 (400)	1.83 (530)	2.36 (670)	2.96 (820)	3.63 (970)
複合化桁	1.55 (300)	2.04 (400)	2.57 (510)	3.15 (620)	3.79 (730)

- ・カッコ内の数値は主桁高 (単位：mm)

高増加に寄与するため、複合化による改善効果が増大すると考えられる。しかし、表-9によると、複合化桁のライフサイクルコストはSS400を上回っており、改善効果は極めて限定的であることが確認される。これは、単位体積当たりの価格がGFRPよりSUS304で高いことが一因と考えられ、単なる複合化だけでなく、材料の使用量を含めた検討が必要であることを示唆している。

表-10は、歩道橋の橋長を変化させたライフサイクルコストを、主桁高や制約条件と併せて示したものである。これによると、制約条件は、GFRPと一致し、橋長によらず活荷重たわみである。また、ライフサイクルコストは、橋長によらずGFRPより高いが、その差異は橋長の増加と共に縮小する傾向にある。これは、幅員を増加させた場合と同様に、活荷重たわみの制限値がGFRPの桁高増加に寄与する場合には、複合化による改善効果が増大することを示唆している。

6. まとめ

本稿で得られた結果は下記のとおりである。

(1) 単純な構造を仮定したプレートガーダー形式の水門や歩道橋を対象とした試算によると、材料費のみを考慮したライフサイクルコストは、適用する材料や土木構造物の種類によらず、主桁本数が少ないほど低くなると考えられた。

(2) 耐食性材料を構造部材に用いたライフサイクルコ

ストの試算によると、TP340以外の耐食性材料の導入効果は、SS400を構造部材に用いたライフサイクルコストの費用構成に支配される結果となった。これは、耐食性材料の実用性が、土木構造物の詳細構造に大きく依存することを示唆している。

(3) 海塩飛沫環境等の厳しい腐食環境で耐食性の高いGFRPは、弾性率が低いため、SUS304との複合化がコスト縮減策の一つになると推察される。複合化桁を用いたライフサイクルコストの試算結果によると、曲げ剛性の改善が重要となる場合には、複合化桁の導入が効果的であると考えられた。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会： <http://www.jssc.or.jp>
- 2) 日本アルミニウム協会： <http://www.aluminum.or.jp>
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編, pp.107-117, 2002.
- 4) 建設物価調査会：建設物価 2011 年 2 月号, 2011.
- 5) 経済調査会：積算資料 2011 年 2 月号, 2011.
- 6) 岩手県農林水産部漁港漁村課：平成 22 年度漁港・漁場設計単価表(公表版), 2010.
- 7) 日本鋼構造協会：鋼橋塗替え塗装の品質向上のために、JSSCテクニカルレポート, No.61, pp.24-51, 2004.
- 8) ダム・堰施設技術協会：水門・樋門ゲート設計要領(案), pp.329-417, 2001.
- 9) 土木学会：FRP 歩道橋設計・施工指針(案), pp.193-222, 2011.
- 10) 土木学会：複合構造標準示方書[共通編], pp.74-88, 2009.
- 11) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説, pp.38-52, 1979.

A FEASIBILITY STUDY ON CORROSION-RESISTANT STRUCTURAL MEMBERS IN TERMS OF LIFE-CYCLE COST

Takeshi KISHIMA

The civil structures exposed to sea spray have been pointed out to enable introduction of the corrosion-resistant materials to be effective for reducing their maintenance costs. This manuscript is studying on the feasibility of corrosion-resistant structural members based on the trial calculation results of the life-cycle costs, for both civil structures with the structural members from corrosion-resistant materials and those additionally with the composed beams of corrosion-resistant materials. The trial calculation results for the water gates or the footbridges assumed to be with simple structures would lead to the feasibility of the corrosion-resistant materials or the composed beams depending largely on details of civil structures.