

新材料の効率的な複合利用技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 22

担当チーム：新材料チーム

研究担当者：西崎 到、木嶋 健

【要旨】

海塩飛沫環境にある構造物は、維持管理費用を縮減する場合に、耐食性に優れた構造材料の導入が効果的であると指摘されている。本課題は、構造材料の効率的な適用方法として提案した高耐食性材料と他の構造材料との複合化桁の応力特性を把握すると共に、耐食性材料を構造部材とした構造物やこの複合化桁を適用した構造物に対して試算したライフサイクルコストやライフサイクル CO₂ 排出量の結果に基づいて、耐食性材料あるいは複合化桁の導入効果を検討したものである。水門や歩道橋を構造物とした試算では、耐食性材料や GFRP と SUS304 との複合化桁の導入が、ライフサイクルコストの改善に寄与するとは言えない結果となった。

キーワード：構造物、耐食性、複合化、ライフサイクルコスト、ライフサイクル CO₂ 排出量

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は、維持管理費用を縮減する場合に、耐食性に優れた構造材料の導入が効果的であると指摘されている。しかし、現時点で入手可能な耐食性材料は、材料価格が高く、コスト面で有効な対策とはならない可能性がある。そのため、材料価格の高い耐食性材料を鋼材等の従来材料を用いた構造物へ効率的に適用し、コスト面でも効果的な構造物を構築することが必要となっている。本課題は、①水門や歩道橋の構造物を対象に、耐食性材料の構造物への効率的な適用方法を提案する、②耐食性材料の構造物への効率的な適用方法として提案した高耐食性材料と他の構造材料との複合化桁を対象に、材料境界部の応力特性を把握する、③水門や歩道橋のライフサイクルコストやライフサイクル CO₂ 排出量を、耐食性材料を構造部材とした場合と高耐食性材料と他の構造材料との複合化桁を適用した場合に対して試算し、耐食性材料や複合化桁の導入効果を検討する、の3点を検討項目としたものである。

2. 研究方法

2. 1 構造材料の効率的な適用方法

2. 1. 1 構造材料の性能

構造物に用いられる構造材料は、鋼材やコンクリートが代表的であるが、一般的に材料価格が比較的低い。一方、耐食性に優れた構造材料は、ステンレス鋼、アルミニウム合金、チタン合金等の無機系材

料、FRP 等の有機系材料が代表的であるが、一般的に材料価格が高い。また、鋼材を部分的に改良した耐候性鋼や溶融亜鉛メッキ鋼板は、材料価格が比較的低いため、耐食性に比較的優れた構造材料として広範に用いられている。そこで、海塩飛沫環境等の厳しい腐食環境での構造材料の耐食性を把握するため、これらの構造材料に対して、既存知見に基づいた整理検討を行う。

2. 1. 2 耐食性に優れた構造材料の適用

耐食性に優れた構造材料を構造物に効率的に適用するためには、構造物の腐食状況を把握することが必要である。そこで、海塩飛沫環境等の厳しい腐食環境にある水門や橋梁を対象に、既存知見に基づいて腐食状況を整理する。さらに、腐食状況の整理結果に基づいて、海塩飛沫環境等の厳しい腐食環境にある水門や歩道橋への耐食性材料の効率的な適用方法を検討する。

2. 2 複合化桁の応力解析

2.1.2 の検討結果によると、海塩飛沫環境等の厳しい腐食環境にある構造物に対しては、高耐食性材料と他の構造材料とを複合化した桁の適用が耐食性の確保に有力であると考えられた。そこで、この様な桁の力学特性を把握するため、力学的に最弱箇所と考えられる境界部の応力特性を解析した。応力解析は、応力と各種の断面パラメータとの関係を明確に把握する観点から、梁理論に準拠した操作性の高い解析手法を用いることとした。

2. 3 構造物のライフサイクル評価

2. 3. 1 ライフサイクルコストの試算

ライフサイクルコストの試算は、鋼材や耐食性材料を構造部材とした構造物や、2.1.2 で提案した高耐食性材料と他の構造材料との複合化桁を適用した構造物に対して行う。試算結果の検討は、これらの構造部材を適用した構造物のライフサイクルコストが最小となる場合に対して行い、耐食性材料あるいは複合化桁の導入効果を主な項目とした。なお、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構造物が水門や橋梁であることを考慮し、水門の扉体および歩道橋の上部工とした。一方、構造物のライフサイクルコストは、材料費と施工費に分類することができる。しかし、施工費は、構造物の設置条件により大きく変化すると考えられ、標準的な費用を設定することが困難である。そのため、試算にあたっては、材料費のみを対象にすることとした。

2. 3. 2 ライフサイクル CO₂ 排出量の試算

構造物のライフサイクル CO₂ 排出量は、材料製造時と施工時に分類することができる。材料製造時の CO₂ 排出量は、産業連関分析で求められた材料 1 単位当たりの CO₂ 排出量 (CO₂ 排出原単位) を用いて算出する。一方、施工時の CO₂ 排出量は、施工費が構造物の設置条件により大きく変化すると考えられるため、標準的な CO₂ 排出量の設定が困難と判断される。さらに、施工時の CO₂ 排出量は、材料製造時の CO₂ 排出量に比べて一般的に極めて小さいと考えられることから、試算にあたっては、材料製造時の排出量のみを対象にすることとした。なお、対象とした構造物は、2.2.1 で設定した水門や歩道橋と同一であり、ライフサイクルコストが最小となる扉体あるいは上部工とした。なお、構造材料の CO₂ 排出原単位は、平成 17 年度産業連関表を用いて算出された値とした。

3. 研究結果

3. 1 構造材料の効率的な適用方法

3. 1. 1 構造材料の性能に関する整理検討

鋼材の SS400 は、淡水環境と海塩飛沫環境の別なく腐食するため、防食塗装を施して耐食性を確保することが一般的である。防食塗装¹⁾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、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。構造物のライフサイクル評価を実施する場合には、鋼材だけでなく、防食塗料も考慮することが必要である。

耐候性鋼 (Weathering Steel)²⁾は、淡水環境では耐食性を有するが、海塩飛沫環境では耐食性をほとんど有しないと考えられている。また、熔融亜鉛メッキ鋼板 (SGCC)²⁾も、犠牲陽極となる亜鉛が溶解するため、海塩飛沫環境では大きな効果が期待できないと考えられている。そのため、耐候性鋼と同様に、淡水環境では耐食性を有するが、海塩飛沫環境では耐食性をほとんど有しないと判断される。

構造材料とするステンレス鋼³⁾は、SUS304 が一般的である。SUS304 は、淡水環境では耐食性が高いが、海塩飛沫環境では耐食性が低下する場合もある。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考えられている。また、材料価格が SS400 に比べて極めて高いため、構造物のライフサイクル評価を実施する場合には、これを十分に考慮することが必要である。

構造材料とするアルミニウム合金⁴⁾は、耐食性の確保が目的である場合には A5083P が一般的である。A5083P は、SUS304 と同様に、淡水環境では耐食性が高いが、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。しかし、A5083P の耐食性は、自然電位が SUS304 より卑であるため、一般的に SUS304 より低くなると考えられる。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 に比べて極めて高く、構造物のライフサイクル評価を実施する場合には、これを十分に考慮することが必要である。

構造材料とするチタン合金は、純チタンが一般的である。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、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り、構造物の設計自由度はアルミニウム合金より高い。しかし、材料価格は、SS400 だけでなく、SUS304 や A5083P に対しても極めて高く、構造物のライフサイクル評価を実施する場合には、これを十分に考慮することが

必要である。

構造材料とする FRP は、相対的に材料価格が低い GFRP が一般的である。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 SUS304 より高く、構造物のライフサイクル評価を実施する場合には、これを十分に考慮することが必要である。

表-1(a), (b)は、上述した構造材料の耐食性や材料価格を含めた性能を、弾性率や強度の物理特性と海塩飛沫環境での定性的な比較結果とに分けて示したものである。

3. 1. 2 耐食性に優れた構造材料の適用方法

SS400 を構造材料とする水門や橋梁は、腐食の程度が部位により異なる。腐食が生じやすい部位は、水門と橋梁の別なく、水分が滞留しやすい箇所である構造や形状が複雑な部位と判断されている。水門の主な腐食部位は、構造が比較的単純なため、形状が複雑な主桁や補助桁の隅角部と考えられている。橋梁の主な腐食部位は、構造が複雑な接合部、形状

表-1 構造材料の性能
(a) 物理特性^{3),4)}

	弾性率 (MPa)	強度* (MPa)
SS400	206,000	240
WS	206,000	240
SGCC	206,000	240
SUS304	197,000	205
A5083P	72,000	195
純チタン	106,000	170
GFRP	27,000	350

*) 金属材料は降伏強度、GFRP は最大強度

(b) 海塩飛沫環境での定性的な比較結果

	耐食性	価格	弾性率	強度
SS400	×	◎	◎	◎
WS	×	◎	◎	◎
SGCC	×	◎	◎	◎
SUS304	△	△	◎	◎
A5083P	△	△	△	○
純チタン	◎	×	○	○
GFRP	○	△	×	◎

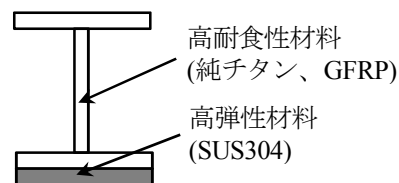
(優れる) ◎~○~△~× (劣る)

が複雑な桁の隅角部であるが、腐食の程度には幾つかの大きな特徴が見られる。橋梁は、風雨の影響を大きく受けるが、風雨には塩分の洗浄効果があるため、桁の外側よりも内側で、桁中間部よりも桁端部で腐食が大きくなる傾向にある。したがって、耐食性材料を水門や橋梁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であると考えられる。

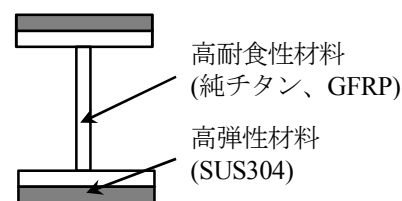
3.1.1 の検討結果によると、海塩飛沫環境等の厳しい腐食環境においても耐食性の高い構造材料は、純チタンと GFRP である。そのため、水門や橋梁で主な腐食部位となる桁や接合部は、これらの構造材料を適用するのが望ましいと考えられる。これらの耐食性材料は、材料価格が高いため、構造物のライフサイクルコストを考慮すると、その使用をできる限り少なくすることが重要である。一方、これらの耐食性材料は、SS400 とほぼ同等の強度を有するが、弾性率が低いため、桁の曲げ剛性が SS400 より低くなる。そのため、構造物の活荷重たわみに対する要求性能を満足するためには、使用量が SS400 より増加すると考えられる。桁の曲げ剛性を増加させる方法の一つは、桁フランジ下端に弾性率が高く一定の耐食性を有する SUS304 を添付する方法である。これは、構造物の主な腐食部位が桁の隅角部等であることを考慮すると、耐食性を確保する有力な方法になり得ると判断される。図-1 は、構造材料を複合化した桁の例を示したものである。

3. 2 複合化桁の応力解析結果

構造材料の複合化は、異種金属材料の接触腐食を防止する観点や、有機系材料である GFRP が対象で



(a) 高弾性材料の桁フランジ下端への添付



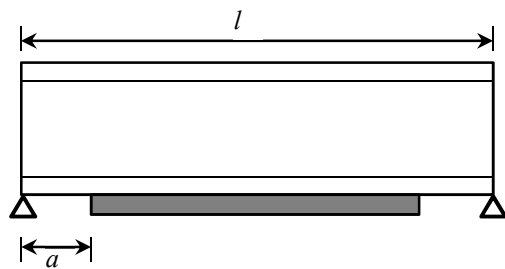
(b) 高弾性材料の桁フランジ上下端への添付

図-1 複合化桁の例

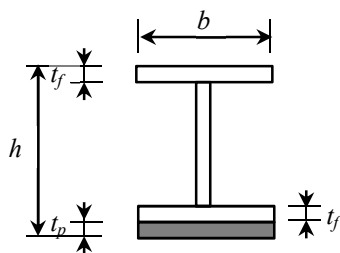
ある点を考慮すると、樹脂接着が一般的と考えられる。そこで、応力解析を行う材料境界部は、樹脂で構成されると仮定した。解析手法は、梁理論に準拠した操作性の高い手法⁵⁾であるが、桁幅方向の断面変化を考慮することができない。しかし、桁幅方向の断面変化による解析結果への影響が小さいと考えられることや、応力と桁長や桁高等のパラメータとの関係を明確に把握する観点から、3次元 FEM 解析よりも有用な解析手法であると判断した。

水門や歩道橋の設計では、重要な設計要素となる主桁は等分布荷重となる。そこで、材料境界部の応力は、等分布荷重を仮定した解析結果に基づいて検討した。図-2(a)は、応力解析の対象とした複合化桁のモデルであり、支点からの距離 a で複合化される桁長 l の単純梁と設定した。図-2(b)は、複合化桁の断面を示したものであり、I 桁部材の桁高を h 、桁幅を b 、上下のフランジ厚を t_f 、添接板の幅を b 、厚さを t_p と設定した。なお、I 桁部材の断面諸量を算出する場合には、桁幅方向への断面変化がないと仮定し、ウェブを無視することとした。

図-3 は、弾性率が低い高耐食性材料の純チタンや GFRP と SUS304 との複合化桁を対象に、材料境界部のせん断応力と剥離応力を、単位幅当たりの等分布荷重 (Uniformly distributed load per unit width) に対して示したものである。ここで、梁のパラメータは、 $a=20\text{mm}$ および $l=2000\text{mm}$ 、断面のパラメータは、 $h=500\text{mm}$ 、 $t_f=10\text{mm}$ および $t_p=3\text{mm}$ とした。



(a) 複合化桁の梁モデル



(b) 複合化桁の断面

図-2 試算に用いた複合化桁のモデル

これによると、材料境界部のせん断応力や剥離応力は、構成材料によらず、境界端部で最大となっている。また、材料境界部の応力は、GFRP が純チタンより高く、I 桁部の弾性率が SUS304 の弾性率とかい離するほど増加する傾向にある。

図-4 は、材料価格が純チタンより低い GFRP と SUS304 との複合化桁を対象に、複合化される箇所を示すパラメータの a が材料境界部のせん断応力や剥離応力に及ぼす影響を示したものである。これによると、材料境界部のせん断応力や剥離応力は、 a の値によらず、端部で最大となっている。また、これらの応力は、複合化される箇所が支点か離れるほど増加する傾向にある。これは、与件となる l に対して a を適切に設定することにより、材料境界部の応力が制御できることを示唆している。

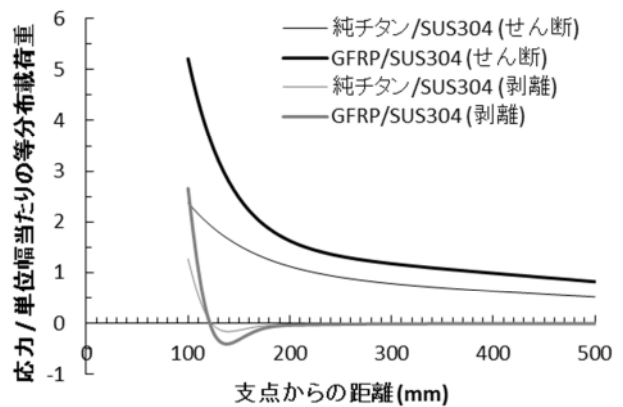


図-3 材料境界部の応力と構成材料との関係

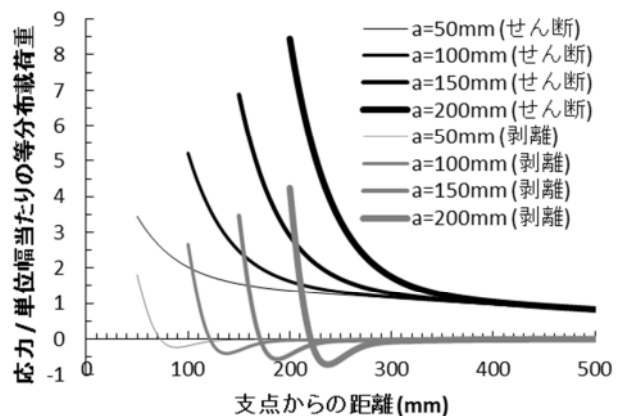
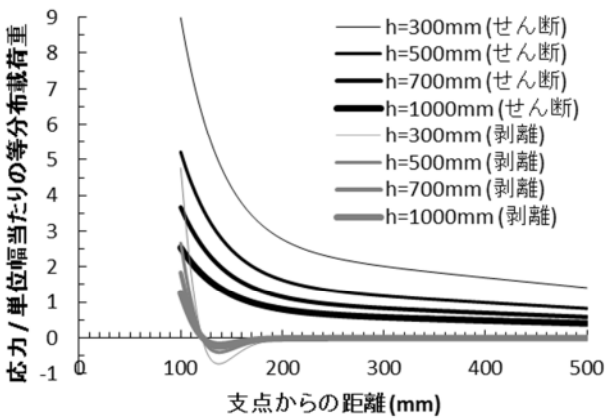


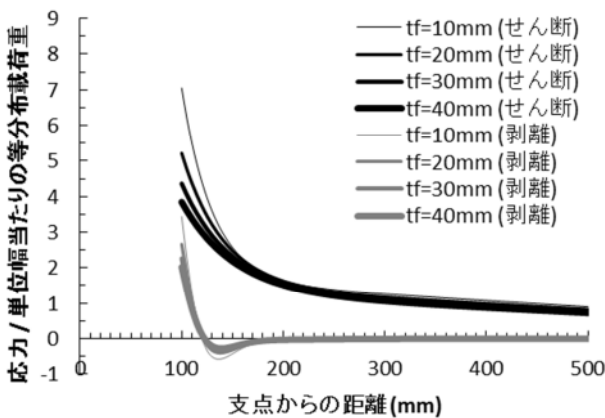
図-4 材料境界部の応力と複合化箇所との関係

図-5(a)~(c)は、GFRP と SUS304 との複合化桁を対象に、断面のパラメータである h 、 t_f および t_p が材料境界部のせん断応力や剥離応力に及ぼす影響を

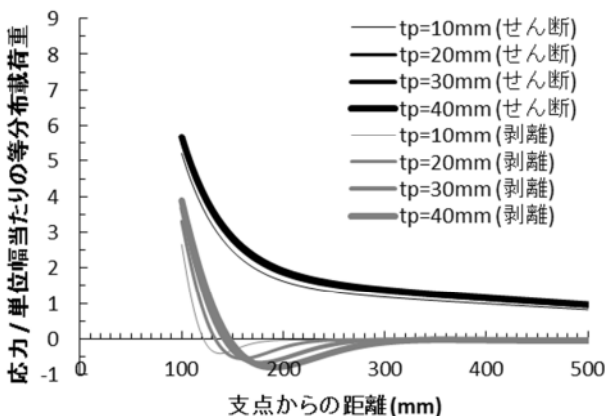
示したものである。これによると、材料境界部のせん断応力や剥離応力は、断面パラメータの別によらず、端部で最大となっている。また、これらの応力



(a) I 桁高との関係 (I 桁フランジ厚 : 20mm, 添接板厚 : 20mm)



(b) I 桁フランジ厚との関係 (I 桁高 : 500mm, 添接板厚 : 20mm)



(c) 添接板の厚さとの関係 (I 桁高 : 500mm, I 桁フランジ厚 : 20mm)

図-5 材料境界部の応力と断面パラメータとの関係

は、I 桁部に用いた GFRP の桁高やフランジ厚が増大するほど、あるいは、添接板に用いた SUS304 の厚さが増大するほど減少する傾向にある。これは、材料境界部の接合強度は、複合化される箇所を示すパラメータである a 以外に、断面パラメータである h 、 t_f および t_p を適切に設定することにより確保できる可能性を示唆している。

3. 3 建造物の評価

3. 3. 1 ライフサイクルコストの試算結果

1) 材料価格

構造材料は、従来材料として代表的な鋼材、耐食性材料であるステンレス鋼、アルミニウム合金、チタン合金、FRP を対象とした。試算にあたっては、建設材料としての一般性や海塩飛沫環境での耐食性を考慮し、鋼材は SS400、ステンレス鋼は SUS304、アルミニウム合金は A5083P、チタン合金は純チタン、FRP は GFRP を用いた。構造材料の価格は、基本的に建設物価や建設積算資料等で公表された構造部材の価格を参考に設定した。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構造材料の価格は、内部資料や市場価格を参考に設定した。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、規格品以外は価格がこれより高くなると考えられる。ただし、試算にあたっては、計算の簡略化を図るため、その影響を無視することとした。表-2 は、試算で用いた構造材料の価格を示したものである。

SS400 を構造材料とした場合には、耐食性を確保するため、材料表面には一般的に塗装が施される。そこで、試算にあたっては、SS400 を構造材料とした場合にのみ塗装費を考慮した。塗装費は、初期塗装時と再塗装時、一般塗装と重防食塗装で異なる。表-3 は、試算で用いた施工費以外の塗装費を一般塗装と重防食塗装の別に示したものである。塗装間隔は、3.1.1 で示したように、海塩飛沫環境等の厳し

表-2 試算で用いた構造材料の価格^{6)~8)}

	比重	材料価格	
		(千円/t)	(千円/m ³)
SS400	7.87	60	500
SUS304	7.93	300	2,400
A5083P	2.71	600	1,650
純チタン	4.51	3,500	16,000
GFRP	1.9	-	2,000

表-3 試算で用いた施工費以外の塗装費²⁾

	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

い腐食環境に対しては、一般塗装で10年、重防食塗装で20年と設定した。

2) 水門

水門の扉体を設計する場合には、多数の構成部位に対して、安全性や使用性を検討することが必要である。一方、試算するライフサイクルコストは、施工費を考慮していないことや、耐食性材料あるいは高耐食性材料と他の構造材料との複合化桁の導入効果の検討が主目的であることから、絶対値より相対値が必要になると考えられる。そこで、試算の対象とする扉体は、できる限り単純な構造を仮定し、主桁、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。また、扉体の安全性や使用性を検討する構造部位は、重要な設計要素である主桁のみとした。

ライフサイクルコストの最小化は、高さが5m、幅が10mの扉体を対象に、主桁の桁数と桁高を変数として行う。主桁が満足すべき性能は、安全性を曲

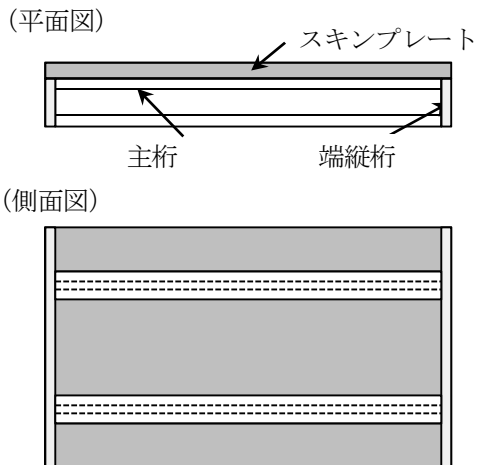


図-6 扉体の概要

表-4 試算で用いた部分係数

	γ_m	γ_b	γ_i	γ_a	γ_f
SS400	1.05	1.1	1.0	1.0	1.0
SUS304	1.05	1.1	1.0	1.0	1.0
A5083P	1.05	1.1	1.0	1.0	1.0
純チタン	1.05	1.1	1.0	1.0	1.0
GFRP	1.3	1.3	1.0	1.0	1.0

げ応力とせん断応力、使用性を活荷重たわみとした。主桁は、桁高以外の設計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、端縦桁はフランジのない主桁に一致するものとした。スキンプレートは、厚さを一定値とし、幅と高さが扉体に一致するものとした。また、設計荷重⁹⁾は、扉体の片側のみ載荷される高さ5mの静水圧荷重とした。図-6に扉体の概要を示す。

水門の設計は、一般的に用いられる許容応力度設計法ではなく、橋梁等の設計で多用される限界状態設計法^{10), 11)}にしたがった。表-4は、試算で用いた部分係数である材料係数 γ_m 、部材係数 γ_b 、構造物係数 γ_i 、構造解析係数 γ_a および作用係数 γ_f を、対象とする構造材料の別に示したものである。また、作用修正係数 ρ_f は、安全性の評価では1.65、使用性の評価では1.0を用いた。

a) 単一材料

主桁の桁数と桁高を変数とするライフサイクルコストの最小化は、式(1)～(4)にしたがって実施し、目的関数をライフサイクルコストの最小化、制約条件を主桁の活荷重たわみ、曲げ応力およびせん断応力とした。主桁の横倒れ座屈や局部圧縮座屈、せん断座屈は考慮していない。また、主桁の本数は2本以上とし、桁高は自由に設定できるものとした。なお、ライフサイクル期間は100年とした。

図-7は、構造材料をGFRPとし、主桁のフランジ幅が30cm、フランジ厚とウェブ厚が20mmである場合に、目的関数と制約条件との関係を示したものである。ここで、たわみ制限値は主桁長の1/400とし、GFRPの弾性率および引張強度は表-1(a)の数値を用いた。また、GFRPの圧縮強度は引張強度と同じ値、せん断強度は引張強度の $1/\sqrt{3}$ として

○目的関数 (ライフサイクルコストの最小化) :

(ライフサイクルコスト)

$$= (\text{材料価格/単位体積}) \times (\text{材料体積})$$

$$+ \sum_{(\text{塗装回数})} (\text{塗装費/単位面積}) \times (\text{塗装面積})$$

$$\rightarrow \min \tag{1}$$

○制約条件 :

①たわみ制限 :

$$(\text{主桁の最大たわみ}) < (\text{たわみ制限値}) \tag{2}$$

②曲げ応力 :

$$(\text{主桁の最大曲げ応力}) < (\text{引張 or 圧縮強度}) \tag{3}$$

③せん断応力 :

$$(\text{主桁の最大せん断応力}) < (\text{せん断強度}) \tag{4}$$

いる。図-7を用いると、①～③の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。その結果、主桁の桁数と桁高の実行可能領域は、①～③に対する実行可能領域の共通部分で表されることになる。目的関数に対応する曲線は、ライフサイクルコストが一致する無差別曲線であり、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。したがって、この場合のライフサイクルコストは、主桁本数が整数値となることを考慮すると、主桁本数が2本の場合に最小となることが分かる。これは、試算で設定した条件に対しては、全ての構造材料で成立しており、限定された条件の下では、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。

表-5は、図-7と同じ設定条件の下で構造材料別に試算した結果を、結果を支配した制約条件と併せて示したものである。ここで、ライフサイクルコストや主桁高は有効数字2桁で示している。これによると、純チタンのライフサイクルコストは他の構造材料より極めて高いが、GFRPやSUS304はSS400材料より極めて高いが、GFRPやSUS304はSS400とほぼ同等であり、A5083PはSS400より低くなっている。高耐食性以外に軽量性という長所を有するGFRPは、試算したライフサイクルコストに施工費が含まれていないことを考慮すると、代表的な耐食性材料として用いられるSUS304より有利な材料となる可能性を有している。また、A5083PはSUS304より耐食性が劣るため、海塩飛沫環境では塗装等の表面処理が必要な場合もあると考えられ、ライフサイクルコストの潜在的な増加要因となる。一方、ライフサイクルコストを支配した制約条件は、SS400、

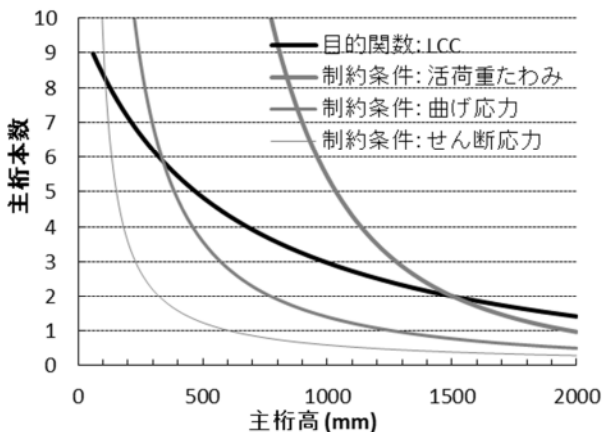


図-7 水門に対する目的関数と制約条件との関係 (GFRP)

表-5 水門に対する試算結果

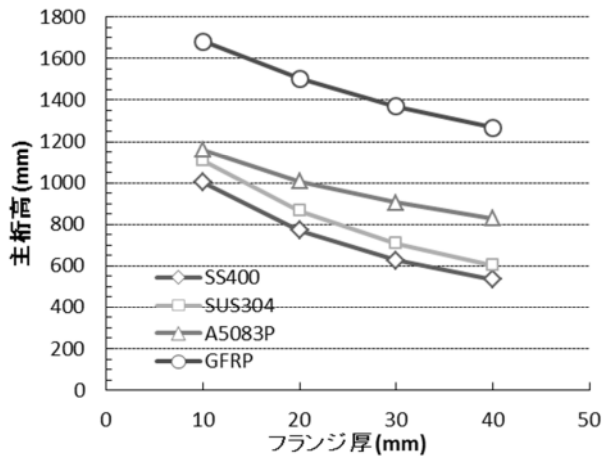
	LCC (百万円)			桁高 (mm)	支配条件
	初期時	塗装時	合計		
SS400	0.6	2.5	3.1	770	曲げ応力
SUS304	3.0	-	3.0	870	曲げ応力
A5083P	2.2	-	2.2	1,000	たわみ
純チタン	21	-	21	990	曲げ応力
GFRP	3.3	-	3.3	1,500	たわみ

SUS304 および純チタンが曲げ応力、A5083P および GFRP が活荷重たわみとなっている。これは、弾性率と強度との比が高い場合には曲げ応力が支配し、低い場合には活荷重たわみが支配する傾向となることを示唆している。

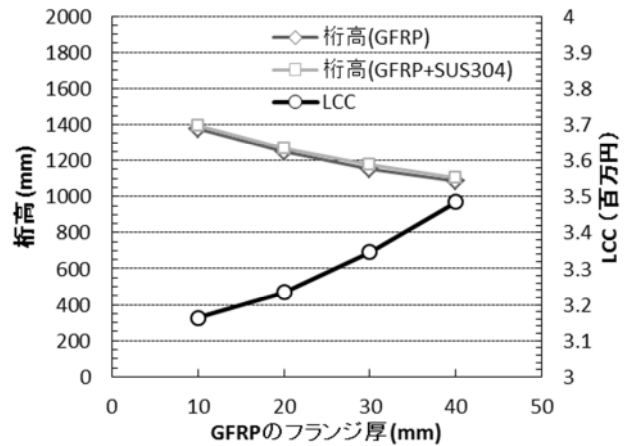
図-8(a), (b)は、主桁上下のフランジ厚を変化させた場合に、主桁高やライフサイクルコストがどのように変化するかを、ライフサイクルコストが極めて高い純チタン以外の構造材料に対して示したものである。図-8(a)によると、主桁高は、構造材料によらず、フランジ厚の増加と共に減少しており、フランジ厚の増加が弾性率や曲げ応力の改善に寄与したと判断される。一方、図-9(b)によると、ライフサイクルコストは、A5083P と GFRP ではフランジ厚と共に増加するが、SS400 や SUS304 ではフランジ厚との間に一定の関係が見られない。これは、ライフサイクルコストが主桁高の減少量や、端縦桁やスキンプレートの費用に依存するためであり、想定する構造が結果を大きく左右することを示唆している。したがって、ライフサイクルコストに影響する要因を正確に把握するためには、構造詳細を明確にした上で検討することが必要である。

b) 複合化桁

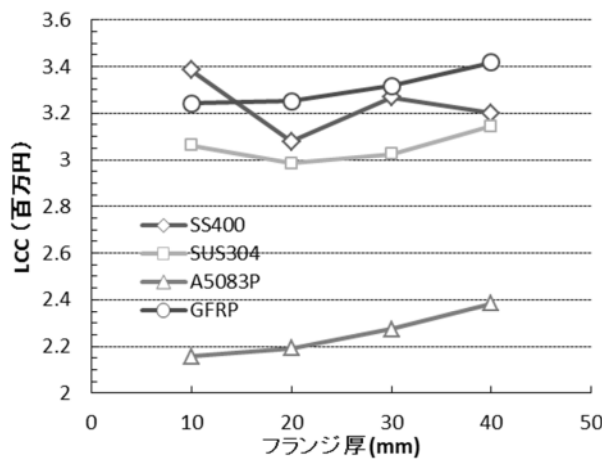
単一材料の試算結果によると、海塩飛沫環境で耐食性の高いGFRPは、活荷重たわみが結果を支配する制約条件となる。そのため、ライフサイクルコストの縮減には、図-1(a)で提案したように、形状が複雑なI桁部に高耐食性材料のGFRPを、形状が比較的単純な桁フランジ下端に高弾性材料のSUS304を適用した複合化桁の導入が有力な解決策となる。試算にあたっては、主桁にGFRPとSUS304との複合化桁を、端縦桁やスキンプレートにGFRPを用いるものとした。また、試算で用いた上記以外の設定条件は、単一材料の場合と同じとした。なお、材料境界部での使用が想定される接着のせん断強度や剥離強度は、現時点で十分な知見が得られていないため、制約条件として適用しないこととした。



(a) 主桁高

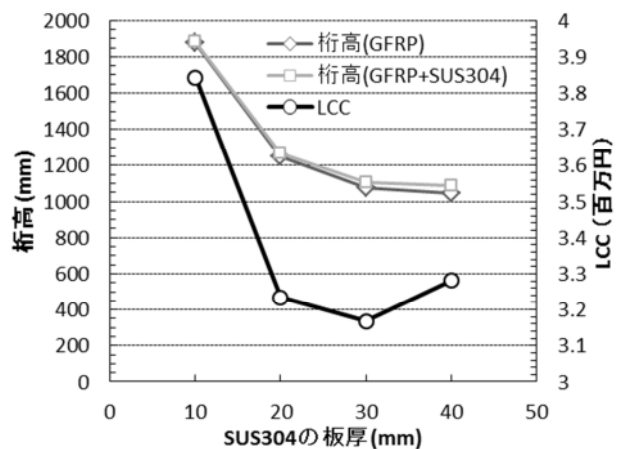


(a) GFRPのフランジ厚



(b) ライフサイクルコスト

図-8 フランジ厚と主桁高やライフサイクルコストとの関係



(b) SUS304の板厚

図-10 フランジ厚や添接板厚と主桁高あるいはライフサイクルコストとの関係 (GFRP/SUS304)

図-9は、複合化桁のフランジ幅が30cm、1桁に用いたGFRPのフランジ厚とウェブ厚が20mm、添接板に用いたSUS304の厚さが20mmである場合に、

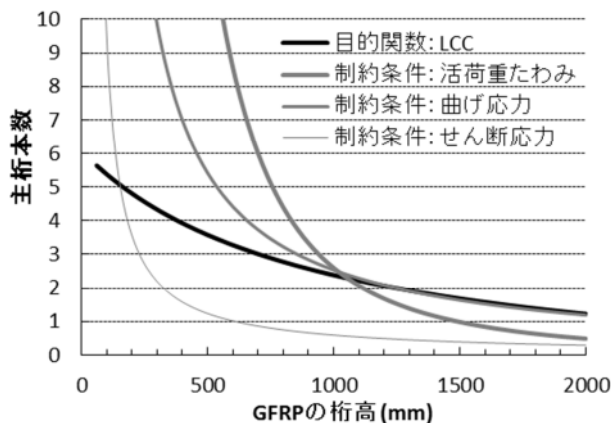


図-9 複合化桁を適用した水門に対する目的関数と制約条件との関係 (GFRP/SUS304)

目的関数と制約条件との関係を示したものである。GFRPを構造材料とした図-7と比較すると、活荷重たわみに対応する曲線が左方へ移動し、曲げ応力に対応する曲線が上方へ移動している。これは、高弾性材料であるSUS304の適用により、活荷重たわみが減少し、主桁下端の曲げ応力が増加したことを示唆している。ライフサイクルコストは、図-7の場合と同様に、主桁本数が2本の場合に最小となるが、支配条件が曲げ応力へと変化する。この場合のライフサイクルコストとGFRPの桁高は、それぞれ3.2百万円および1200mmであり、GFRPを構造材料とした場合に比べて幾分改善されている。これは、GFRPの桁高減少に伴い、端縦桁の桁高減少も寄与したことが一因と考えられる。

図-10(a)は、SUS304の厚さを20mmと設定し、GFRPの上下フランジ厚を変化させた場合に、ライフサイクルコストや主桁高がどのように変化するかを

示したものである。これによると、主桁高はフランジ厚の増加と共に減少するが、ライフサイクルコストはフランジ厚と共に増加している。これは、フランジ厚の増加に伴う主桁高の減少が小さく、GFRPの使用量がフランジ厚と共に増加したことを示唆している。一方、図-10(b)は、GFRPの上下フランジ厚を20mmと設定し、SUS304の厚さを変化させた場合に、ライフサイクルコストや主桁高がどのように変化するかを示したものである。これによると、主桁高はSUS304の増厚と共に減少するが、ライフサイクルコストは一定の傾向を示していない。また、支配条件は、SUS304の厚さが10mmと20mmの場合には曲げ応力となるが、30mmと40mmの場合には活荷重たわみへと変化している。SUS304の厚さとライフサイクルコストとの関係は、主桁高の減少がSUS304の増厚と共に縮小したことで生じたと考えられ、桁高減少のメカニズムが変化したことが一因と推察される。

3) 歩道橋

歩道橋の上部工を設計する場合には、水門と同様に、多数の構成部位に対して、安全性や使用性を検討することが必要である。また、試算するライフサイクルコストは、今回の検討項目では、絶対値より相対値が必要になると考えられる。そこで、上部工の構造は、水門と同様にできる限り単純な構造を仮定し、主桁、床版プレート、床版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。また、安全性や使用性を検討する構造部位は、重要な設計要素である主桁のみとした。

ライフサイクルコストの最小化は、幅員が2m、橋長が20mの歩道橋を対象に、主桁の桁数と桁高を変数として行う。主桁が満足すべき性能は、水門と同様に、安全性を曲げ応力とせん断応力、使用性を活荷重たわみとした。主桁は、桁高以外の設計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、厚さを一定値とし、幅員と長さが歩道橋に一致するものとした。また、設計

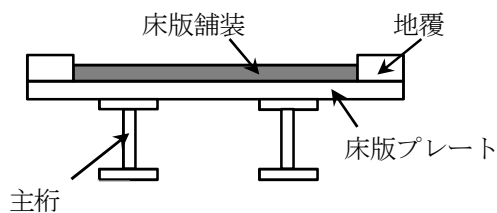


図-11 歩道橋の概要¹⁰⁾

荷重は、複合構造物¹⁰⁾や歩道橋の設計基準¹²⁾にしたがい、床版舗装に載荷される3.5N/m²の活荷重や自重とした。設計方法は限界状態設計法^{10),11)}に、構造材料や設計荷重の部分係数は、表-4の数値にしたがうものとした。図-11に歩道橋の概要を示す。

a) 単一材料

歩道橋の構造部材は、主桁と床版プレートが単一の構造材料、床版舗装がアスファルト、地覆がGFRPで構成されると仮定した。ライフサイクルコストの最小化は、水門と同様に、式(1)にしたがって実施し、主桁の横倒れ座屈や局部圧縮座屈、せん断座屈は考慮していない。また、主桁の本数や桁高に関する制約条件、100年としたライフサイクル期間も水門の場合と同じである。

図-12は、構造材料をGFRPとし、主桁のフランジ幅が30cm、フランジ厚とウェブ厚が20mmである場合を対象に、目的関数と制約条件との関係を示したものである。水門を対象とした図-7と比較すると、目的関数や制約条件に対応する曲線は、主桁1本当たりの設計荷重が小さいため、全体的に左下へと移動している。さらに、主桁長の増加は、曲げ応力やせん断応力より、たわみの増加に大きく寄与するため、活荷重たわみに対応する曲線は、曲げ応力やせん断応力に対応する曲線とかい離している。また、曲げ応力やせん断応力に対応する曲線は、安全性の評価で構造部材の自重を考慮するため、主桁高が低い場合に急勾配となっている。一方、ライフサイクルコストは、図-7と同様に、主桁本数が2本の場合に最小となる。これは、試算で設定した条件に対しては、全ての構造材料で成立しており、水門の場合と同様に、限定された条件の下では、主桁

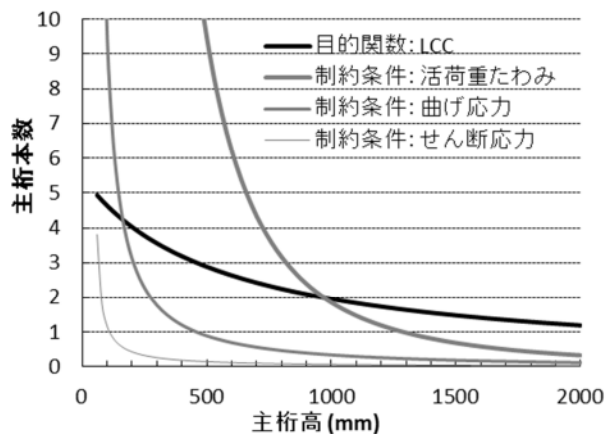


図-12 歩道橋に対する目的関数と制約条件との関係 (GFRP)

表-6 歩道橋に対する試算結果

	LCC (百万円)			桁高 (mm)	支配条件
	初期時	塗装時	合計		
SS400	0.96	1.4	2.4	410	たわみ
SUS304	3.2	-	3.2	410	曲げ応力
A5083P	2.6	-	2.6	640	たわみ
純チタン	21	-	21	540	たわみ
GFRP	3.6	-	3.6	970	たわみ

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。

表-6 は、図-12 と同じ設定条件の下で構造材料別に試算した結果を、結果を支配する制約条件と併せて示したものである。ここで、ライフサイクルコストや主桁高は有効数字 2 桁で示している。これによると、耐食性材料のライフサイクルコストは、全体的に SS400 より高くなっている。また、支配条件は、主桁長が水門の試算で設定した長さの 2 倍であることから、SUS304 以外は活荷重たわみとなっている。これは、主桁長が長い場合には、SS400 に比べて一般的に弾性率の低い耐食性材料が、ライフサイクルコストの面で、SS400 より有利にならないことを示唆している。

b) 複合化桁

複合化桁は、水門の場合と同様に、形状が複雑な I 桁に GFRP を、形状が比較的単純な桁フランジ下端に SUS304 を適用するものとした。試算にあたっては、主桁に GFRP と SUS304 との複合化桁、床版プレートに GFRP を用いるものとするが、床版舗装や地覆に用いる構造材料は、単一材料の場合と同様に、それぞれアスファルトと GFRP とした。また、試算で用いた上記以外の設定条件は、単一材料の場合と同じとした。

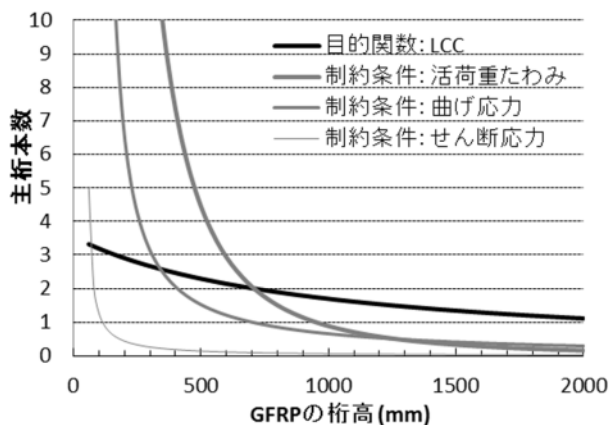


図-13 複合化桁を適用した歩道橋に対する目的関数と制約条件との関係 (GFRP/SUS304)

合と同じとした。

図-13 は、複合化桁のフランジ幅が 30cm、I 桁に用いた GFRP のフランジ厚とウェブ厚が 20mm、添接板に用いた SUS304 の厚さが 20mm である場合に、目的関数と制約条件との関係を示したものである。これによると、活荷重たわみに対応する曲線は、図-12 と比べて左方向へ移動しており、主桁高の減少に寄与することが分かる。しかし、ライフサイクルコストは、0.2 百万円高い 3.8 百万円となり、フランジ下端に適用した SUS304 の費用が主桁高の減少効果を上回る結果となっている。

3. 3. 2 ライフサイクル CO₂ 排出量の試算結果

1) CO₂ 排出量原単位

産業連関分析で求められる CO₂ 排出原単位は、産業連関表で規定した産業に対応したものである。そこで、構造材料の CO₂ 排出原単位は、当該構造材料を生産する産業の CO₂ 排出原単位と同じ値とした。表-7 は、水門や歩道橋の試算で用いた構造材料、塗装および床版舗装の CO₂ 排出原単位を示したものである。

2) 水門

表-8 は、表-5 と同じ設定条件の下で試算した水門のライフサイクル CO₂ 排出量を、有効数字 2 桁で示したものである。これによると、A5083P や GFRP のライフサイクル CO₂ 排出量は、他の構造材料に比べて小さくなっている。特に、海塩飛沫環境で耐食

表-7 試算に用いた材料の CO₂ 排出原単位¹³⁾

	CO ₂ 排出量 (g-CO ₂ /円)
SS400	24.59
SUS304	24.59
A5083P	3.62
純チタン	4.92
GFRP	3.78
樹脂塗装	5.19
アスファルト舗装	3.27

表-8 水門に対するライフサイクル CO₂ 排出量の試算結果

	LCCO ₂ (t-CO ₂)		
	初期時	塗装時	合計
SS400	15	20	35
SUS304	75	-	75
A5083P	7.8	-	7.8
純チタン	110	-	110
GFRP	12	-	12

表-9 歩道橋に対するライフサイクル CO₂ 排出量の試算結果

	LCCO ₂ (t-CO ₂)		
	初期時	塗装時	合計
SS400	16	12	37
SUS304	71	-	71
A5083P	9.5	-	9.5
純チタン	100	-	100
GFRP	14	-	14

性の高い GFRP は、代表的な耐食性材料の SUS304 を大きく下回っている。また、GFRP と SUS304 との複合化桁を用いた場合には、ライフサイクル CO₂ 排出量が 18t となり、GFRP を構造材料とした場合に比べて増加している。

3) 歩道橋

表-9 は、表-6 と同じ設定条件の下で試算した歩道橋のライフサイクル CO₂ 排出量を、有効数字 2 桁で示したものである。これによると、ライフサイクル CO₂ 排出量は、水門の場合と同様に、A5083P や GFRP が他の構造材料に比べて小さく、特に GFRP が SUS304 を大きく下回っている。また、GFRP と SUS304 との複合化桁を用いた場合には、ライフサイクル CO₂ 排出量が 26t となり、GFRP を構造材料とした場合に比べて大きく増加している。

4. まとめ

本研究では、耐食性材料の性能や構造物への効率的な適用方法、耐食性材料を導入した水門や歩道橋のライフサイクルコストやライフサイクル CO₂ 排出量について検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 海塩飛沫環境等の厳しい腐食環境でも耐食性の高い構造材料は、鋼材に比べて、価格が高く、弾性率が低い純チタンや GFRP が代表的と考えられた。また、供用期間中の維持管理費の縮減に効率的な構造部材として、形状が複雑な I 形状部分に GFRP を、形状が比較的単純なフランジ下部に SUS304 を適用した複合化桁を提案した。
- 2) GFRP と SUS304 との複合化桁に対する材料境界部のせん断応力や剥離応力は、複合化端部が支点から離れるほど増加する傾向にある。また、材料境界部の応力は、GFRP の高さやフランジ厚が増大するほど、あるいは、SUS304 の厚さが増大するほど減

少する傾向にある。

3) 水門や歩道橋のライフサイクルコストは、限定された設定条件の下では、主桁本数が 2 本の場合に最小になると考えられた。また、期間を 100 年としたライフサイクルコストは、水門の場合には SUS304 や GFRP が SS400 とほぼ同等になるに対し、歩道橋の場合には SUS304 や GFRP が SS400 より高くなる結果となった。これは、主桁長を含む構造詳細が結果を大きく左右することを示唆している。

4) GFRP と SUS304 との複合化桁を導入した構造物のライフサイクルコストは、水門の場合には幾分減少するが、歩道橋の場合には幾分増加する傾向にあった。

5) 期間を 100 年とした水門や歩道橋のライフサイクル CO₂ 排出量は、ライフサイクルコストが最小となる構造を対象とした場合には、A5083P や GFRP で小さくなる傾向が見られた。

今後は、現時点で得られる耐食性材料の枠にとらわれず、実用性の観点から、耐食性に優れた構造材料を検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 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、2004
- 2) 独立行政法人土木研究所新材料チーム：「河川・ダム施設防食ガイドライン (案) 共通編」、土木研究所資料第 3879 号、2004
- 3) 国立天文台：理科年表 CD-ROM、2005
- 4) 日本機械学会：機械工学便覧・基礎編、2005
- 5) S.T. Smith and J.G. Teng：”Interfacial stresses in plated beams”, Engineering Structures, No.23, pp.857-871, 2001.
- 6) 建設物価調査会：「建設物価 2011 年 2 月号」、2011
- 7) 経済調査会：「積算資料 2011 年 2 月号」、2011
- 8) 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)」
- 9) ダム・堰施設技術協会：「水門・樋門ゲート設計要領 (案)」、2001
- 10) 土木学会：「複合構造標準示方書」、2009
- 11) 土木学会：「FRP 歩道橋設計・施工指針 (案)」、2011
- 12) 日本道路協会：「立体横断施設技術基準・同解説」、1979
- 13) 南斉規介、森口祐一：「産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID)」：2005 年表 (β 版)、<http://www.cger.nies.go.jp/publication/D031/index-j.html>、2009

Title: A study on efficient application method of advanced materials

Budget: Grants for operating expenses (General account)

Research period: 2009FY~2010FY

Research team: Advanced Materials Team,
Materials and Geotechnical Engineering Group

Persons in charge: Itaru NISHIZAKI, Takeshi KISHIMA

Abstract:

The structures exposed to sea spray have been pointed out to enable the introduction of corrosion-resistant materials to be effective for reducing their maintenance costs. This subject is to study on the effects of introduction to those structures of corrosion-resistant materials or the composed beams of high corrosion-resistant materials and others based on the trial calculation results of lifecycle costs or lifecycle CO₂ emissions, adding to obtain the stress properties of those composed beams proposed as an efficient application method of corrosion-resistant materials. Trial calculation for water gates and footbridges resulted in introduction of corrosion-resistant materials and composed beams of GFRP and SUS304 not surely contributing to the improvement of their lifecycle costs.

Keywords: Structure, Corrosion-resistance, Composing, Lifecycle cost, Lifecycle CO₂ emission