

# 第 1 章 鋼材の腐食と防食

本章では、鋼材の腐食を分類してその形態の特徴を記し、環境ごとに腐食の特徴を整理した。鋼材の防食方法についてはそれぞれの特徴を記述した。また塗装に関しては、鋼構造物用防食塗料と塗装系および塗装周辺技術の変遷を整理し、本書執筆時点での塗装基準および重防食塗装の適用例を紹介した。

## 1.1 鋼材の腐食

鋼材とは、鉄に 0.02～2%の炭素を含むもので、炭素鋼（あるいは普通鋼）と呼ばれている。鋼材と鉄の化学的性質はほぼ同じである。鉄は純粋な金属として存在することはほとんどなく、酸化物や硫化物などの鉄鉱石として産出する。これらを高炉で還元して銑鉄とし、それを製鋼して鋼材としている。鋼材は、そのままでは不安定であるため自然界に存在する酸化物に戻ろうとする。すなわち、鋼材は、大気中で水分の存在下で表面から酸化されて熱力学的に安定な酸化鉄に戻る。この酸化鉄が「錆」である。

### 1.1.1 腐食<sup>1),2)</sup>

腐食とは、金属材料が使用環境中の物質と化学反応（酸化還元反応）あるいは電気化学反応によって、金属イオンまたは非金属の化合物となって損耗していく現象である。

大気中や水中での鋼材の腐食は、鋼材表面で起こる電気化学反応である。アノード、カソードが、鋼材表面の別々の場所で同時に発生して局部電池を形成する。図 1.1.1 に鋼材表面で発生する局部電池の模式図を示す。

中性水溶液中での一般的な錆生成反応は以下のように進行する。アノード領域では鉄が電子を失って鉄イオンとなる溶出反応が起こり（反応式(1)）、カソード領域では水と酸素が電子を受け取って水酸化物イオンの生成反応が起こる（反応式(2)）。さらに、鉄イオンと水酸化物イオンが反応して水酸化鉄（Ⅱ）、水酸化鉄（Ⅲ）を経て酸化鉄（Ⅲ）が生成し（反応式(3)～(5)）、錆に変化する。



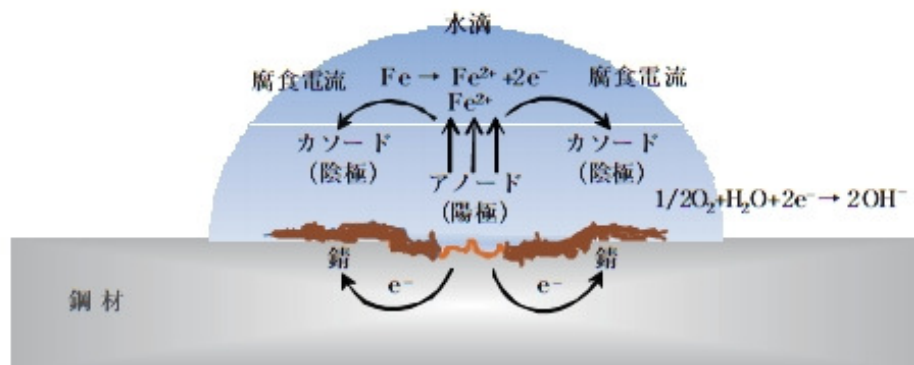
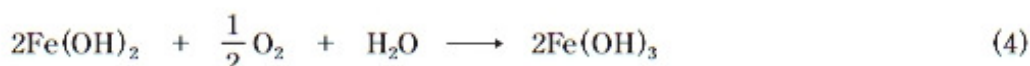


図 1.1.1 鋼材表面で発生する局部電池の模式図 (中性水溶液中の腐食)



アノード領域で生じるアノード反応（陽極反応）とカソード領域で生じるカソード反応（陰極反応）は、必ず等量で進行する。一方の反応を抑制すれば、もう一方の反応も抑制され腐食は止まる。鉄が溶出するアノード反応が生じるためには、水分と鉄の接触が必要であり、カソード反応の進行には、水と酸素の存在が必要である。このように、水と酸素の存在は腐食反応が生じるための不可欠な条件であるとともに、水と酸素の量によってさまざまな組成の錆となる。したがって、腐食を防止する基本的な方法は、水あるいは酸素の供給を断つことである。鉄錆（腐食生成物）の種類を表 1.1.1 に示す。

表 1.1.1 鉄錆（腐食生成物）の種類<sup>3)</sup>

化合物	名称	形状
$\alpha\text{-FeOOH}$	ゲーサイト/geothite	針状
$\beta\text{-FeOOH}$	アカガネイト/akaganeite	針状
$\gamma\text{-FeOOH}$	レピドクロサイト/lepidocrocite	針状
$\delta\text{-FeOOH}$	—	六角板状
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	水酸化第一鉄 /iron(II)hydroxide	六角板状
$\text{FeO}$	ウスタイト/wustite	(結晶：立方晶)
$\text{Fe}_3\text{O}_4$	マグネタイト(黒錆)/magnetite	八面体状, 六面体状
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	ヘマタイト(赤錆)/hematite	六角板状, 八面体状
$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	マージェマイト/maghemite	八面体状
緑錆 I, II	グリーンラスト/green rust	六角板状
無定形錆	—	非晶質

### 1.1.2 腐食の分類と形態

鋼材の腐食にはさまざまな形態があり、代表的な腐食はおおむね図 1.1.2 のように分類できる。湿食は、常温状態において水と酸素の存在下で生じる腐食であり、鉄がイオン化して水の中へ溶解する電気化学反応である。乾食は、高温状態で環境中の物質と反応して生じる腐食であり、そのほとんどが酸化物生成反応である。乾食の例としては、熱間圧延時に鋼材表面にミルスケール（黒皮）

## 1.2 鋼材の防食

### 1.2.1 鋼構造物の防食法

鋼構造物の各種防食法を図 1.2.1 に示す。防食法は、表面被覆、耐食性金属材料、電気防食、環境制御に分類される。表面被覆は、被覆する材料によって、有機材料被覆（塗装、厚膜被覆）、金属材料被覆（溶融めっき、金属溶射、耐食性金属被覆）に分類される。代表的な表面被覆による防食法について以下に述べる。

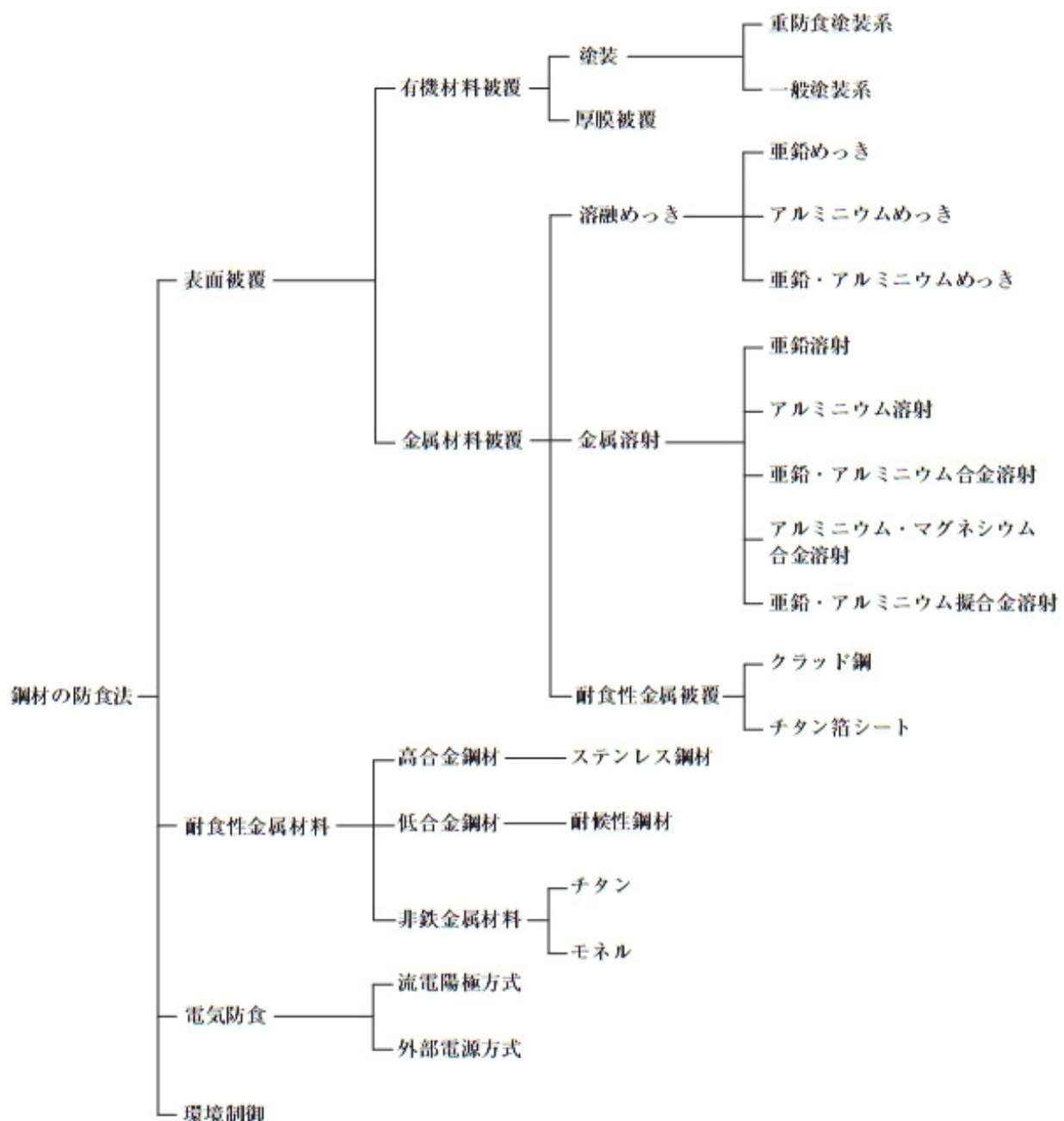


図 1.2.1 鋼構造物の防食法

## (1) 塗装

### 1) 塗料の機能

塗装は、鋼構造物を腐食から護るために広く用いられている防食法である。鋼材表面に塗装して形成した塗膜が、腐食因子である酸素と水や腐食促進物質である塩化物イオンなどの侵入を抑制して鋼材を保護する。塗装系は、一般塗装系および、より長期の耐久性を有する重防食塗装系に大別される。重防食塗装系塗膜の防食機構の模式図を図 1.2.2 に示す。エポキシ樹脂塗料などの下塗塗膜が環境遮断の役割を担い、ふっ素樹脂塗料などの上塗塗膜は紫外線による下層塗膜の劣化を防ぐとともに美観を保つ。鋼道路橋の一般外面の塗装系では、防食下地として塗装されるジンクリッチペイントは、塗膜に含まれる亜鉛末が鋼材表面に接触しており、塗膜に傷が入った場合などに犠牲防食作用を発揮して鋼材の腐食を防ぐ役割を担っている。溶出した亜鉛は、水分と反応して亜鉛化合物を生成して保護皮膜を形成する。

一般塗装系と重防食塗装系の適用例として、写真 1.2.1 に一般塗装系を塗装後 8 年経過した田園部の橋梁の全景および桁内部を、写真 1.2.2 に重防食塗装系を塗装後 9 年経過した海浜部の橋梁の

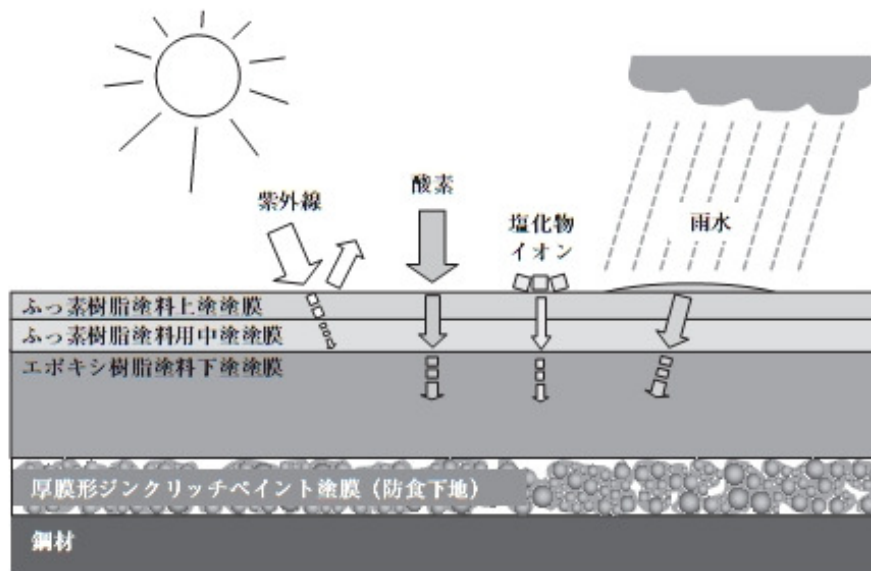


図 1.2.2 重防食塗膜の防食機構の模式図



(a) 全景



(b) 桁内部

写真 1.2.1 一般塗装系が適用された橋梁

## 第2章 重防食塗装

本章では、社会基盤ストックの現状と課題を整理して重防食塗装の必要性を説く。これまで明確でなかった重防食塗装の定義を示し、重防食塗装系を構成する各層の機能を整理し、重防食塗装系の耐久性データを示してその期待耐用年数を記した。さらに、重防食塗装系を構成する各層の塗料について詳述した。

### 2.1 社会基盤ストックの現状と課題

鋼構造物は、産業革命以降増加し大型化が進んだ。わが国においても高度経済成長期以降、社会基盤である橋梁などが急速に整備されてきた<sup>1),2)</sup>。代表的な社会基盤ストックである道路橋について、鋼橋とコンクリート橋を合わせた全橋梁のうち、橋長15m以上の橋梁の架設からの経過年分

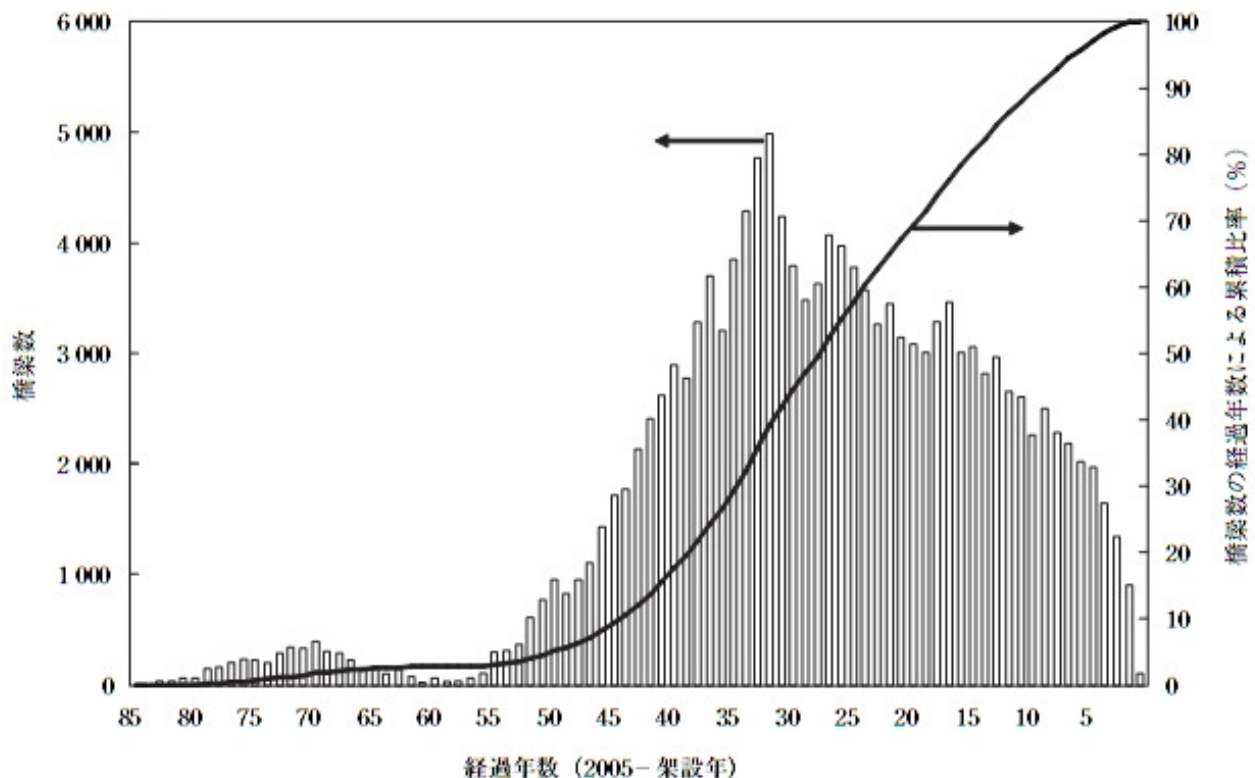


図2.1.1 道路橋の架設からの経過年分布<sup>3)</sup>

布を図2.1.1に示す。高度成長期には多く架設され、それ以降に架設される橋梁数は減少したが、調査当事で30年以上経過した橋梁が全橋梁の約半分を占めている。2011年現在ではさらに比率が多くなっている。

21世紀に入ってわが国の財政事情が逼迫してきたため、橋梁などの社会基盤ストックは建設から維持管理に重点を移してきている。すなわち、社会基盤ストックの維持管理費用を低減するため、現在供用されている社会基盤ストックの長寿命化が求められている。

鋼道路橋の架替え理由のひとつに鋼材の腐食がある。このため、橋梁などの鋼構造物を長寿命化するためには、鋼材を長期にわたって確実に防食することが不可欠である。道路橋では、本州四国連絡橋などで20年以上の実績を有する重防食塗装を一般腐食環境の橋梁にも適用し長寿命化を目指した方針が示されている<sup>4)</sup>。

## 2.2 重防食塗装の定義

### 2.2.1 重防食塗装の適用環境

重防食塗装は、北海道から沖縄の大气腐食環境全般に適用されるものであり、水中部では適用の対象外とする。第1章で記述した大气腐食環境は、以下に示すように一般腐食環境と厳しい腐食環境に分類される。

- ① 厳しい腐食環境——海浜地区や海上などの潮風が強く、飛来塩分の影響を強く受ける環境。
- ② 一般腐食環境——都市部、田園部、山間部、工業地帯などの飛来塩分の影響を受けない環境。

腐食環境区分を表2.2.1に示す。ISOでは、工業地帯の一部を厳しい腐食環境に区分している。一方、わが国では、公害防止技術が進み工業地帯の環境汚染物質(SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>)が減少しており、「1.1.3 腐食と環境」で記述したように、工業地帯であっても鋼材の腐食速度は田園、山間、都市部とほぼ同等であるので、工業地帯を一般腐食環境として区分する。また、山間部や田園部などの一般腐食環境においても、特に道路橋では、冬季間の道路交通確保のため塩化ナトリウムや岩塩などの凍結防止剤が大量に散布されており、凍結防止剤が散布される場所は、散布量や鋼構造物の構造によっては厳しい腐食環境として取り扱うことになる。

また同じ構造物でも、部位により鋼材の腐食性は大きく異なることがあるので、注意が必要である。たとえば、沿岸部の橋梁では、ウェブ内側の下フランジ上面などに巻き込まれた飛来塩分は、

表 2.2.1 腐食環境区分

本書での環境区分	地域での区分	日本における鋼材腐食速度 ( $\mu\text{m}/\text{年}$ )
一般腐食環境	山間部	～ 50
	田園部	
	都市部	
	工業地帯*	
厳しい腐食環境	海岸、海上部	50～200

(注) \* わが国の工業地帯では鋼材の腐食速度が大きくなり、一般腐食環境に区分する。

## 第7章 重防食塗料の今後の展開

近年、塗装の分野でも環境保全が求められるようになり、光化学スモッグや地球温暖化対策として、塗料中に含まれている揮発性有機化合物（以下、VOCと略す）を削減する取組みが行われている。寒冷地の低温条件下でも塗装可能な塗装系や、重防食塗装系の初期コストを削減するため塗装回数を削減した塗料や、より高性能化した上塗塗料などの適用が検討されている。

本章では、今後の重防食塗料としてVOCを削減した低溶剤形塗料、無溶剤形塗料、水性塗料、無機系塗料について、寒冷地の低温条件下でも塗装可能な寒冷地用塗料、および重防食塗装系の初期コストを削減する中塗上塗兼用、下塗上塗兼用塗料、ならびに新しいふっ素樹脂塗料や省検査形膜厚制御塗料を紹介した。

### 7.1 水性塗料

わが国でも地球環境や居住環境に対する関心が非常に高くなってきており、光化学スモッグの要因といわれるトルエン、キシレンなどのVOC規制が強化されてきた。工場内塗装においては、工程や設備の改善によるVOC排出抑制が期待できるが、現場塗装ではこれらの対策は困難であり、塗料に含まれるVOC量を大幅に削減する必要がある。鋼構造物塗装においても例外ではなく、BTX（ベンゼン、トルエン、キシレン）などの強溶剤系塗料からMIR値（Maximum Incremental Reactivity、大気中の光化学オキシダント濃度増大に影響を及ぼすオゾン生成能の指標）が低く、人体への影響も少ないミネラルスピリット（ターペン）中心の弱溶剤系への移行が進んできたが、さらにVOC排出量削減のため無溶剤形塗料および水性塗料へと転換が求められてきている。

最近では、鋼鉄道橋、歩道橋などの鋼構造物の塗替えに際して水性塗料が試験塗装されており、施工性と併せて長期耐久性の評価が始められている。また、新設塗装、塗替塗装おのおのについて水性塗装系の塗膜性能試験、長期耐久性試験、施工性試験を行い、その実用性の総合評価を行い、鋼道路橋塗装のVOC削減暫定水性塗装仕様の提案が行われた<sup>1)</sup>。

水性塗料の実用性を評価した結果、溶剤形塗料と比較して以下の点が明らかとなった。まず、水性無機ジンクリッチペイントは、たれ限界や割れ限界が溶剤形無機ジンクリッチペイントと比較して劣り、施工時の湿度条件の影響も受けやすく、膜厚許容幅も狭く、ミストコートを施しても下塗塗装時に泡が生じやすい傾向があった。また、水性有機ジンクリッチペイントおよび水性エポキシ樹脂塗料下塗についても、たれ限界膜厚が溶剤形と比較すると劣っていた。

表 7.1.1 鋼道路橋新設 VOC 削減暫定水性塗装仕様  
(エアレススプレー塗装, VOC 削減率 70%程度)

塗装工程	塗料名	標準 使用量 (g/m <sup>2</sup> )	標準膜厚 (μm)	塗装間隔	
製 鋼 工 場	素地調整	プラスト処理 素地調整程度 ISO Sa 2 1/2		4時間以内	
	プライマー	無機ジंकリッチプライマー	160	(15)	6か月以内
橋 梁 製 作 工 場	二次素地調整	プラスト処理 素地調整程度 ISO Sa 2 1/2		4時間以内	
	防食下地	無機ジंकリッチペイント	600	75	2～10日
	ミストコート	水性エポキシ樹脂塗料下塗	160	-	1～10日
	下塗	水性エポキシ樹脂塗料下塗	200	40	1～10日
	下塗	水性エポキシ樹脂塗料下塗	200	40	1～10日
	下塗	水性エポキシ樹脂塗料下塗	200	40	1～10日
	中塗	水性ふっ素樹脂塗料用中塗	170	30	1～10日
	上塗	水性ふっ素樹脂塗料上塗	140	25	1～10日

表 7.1.2 旧塗膜が一般塗装系の場合の鋼道路橋塗替 VOC 削減暫定水性塗装仕様  
素地調整程度 1種 (エアレススプレー塗装, VOC 削減率 90%程度)

塗装工程	塗料名	標準 使用量 (g/m <sup>2</sup> )	標準膜厚 (μm)	塗装間隔
素地調整	素地調整程度 1種			4時間以内
防食下地	水性有機ジंकリッチペイント	300	37.5	1～10日
防食下地	水性有機ジंकリッチペイント	300	37.5	1～10日
下塗	水性エポキシ樹脂塗料下塗	200	40	1～10日
下塗	水性エポキシ樹脂塗料下塗	200	40	1～10日
下塗	水性エポキシ樹脂塗料下塗	200	40	1～10日
中塗	水性ふっ素樹脂塗料用中塗	170	30	1～10日
上塗	水性ふっ素樹脂塗料上塗	140	25	1～10日

以上のことから、現時点では、水性無機ジंकリッチペイントの適用は困難であると判断し、新設 VOC 削減暫定水性塗装仕様では溶剤形無機ジंकリッチペイントを適用している。また、水性有機ジंकリッチペイントおよび水性エポキシ樹脂塗料下塗についても、1回当たりの塗付膜厚を水性有機ジंकリッチペイントは 37.5 μm、水性エポキシ樹脂塗料下塗は 40 μm または 45 μm とする暫定水性塗装仕様を提案している。鋼道路橋新設 VOC 削減暫定水性塗装仕様 (VOC 削減率 70%程度) を表 7.1.1、旧塗膜が一般塗装系の場合の鋼道路橋塗替 VOC 削減暫定水性塗装仕様：素地調整程度 1種 (VOC 削減率 90%程度) を表 7.1.2 に示す。

## 7.2 無溶剤形塗料

水性塗料以外に VOC 削減効果が期待できる塗料は、無溶剤形塗料と低溶剤形塗料である。特に、