

現場塗装時の外部環境と鋼構造物塗装の耐久性の検討

【要旨】

寒冷地用塗料の耐久性、施工性、施工対策を明らかにするための検討を行った。室内促進劣化試験および暴露試験の結果、有機ジンクリッチペイント、ふっ素を使用した仕様は通常塗装仕様 Rc- I と概ね同等以上の耐久性を有していた。また、氷点下および気温が比較的高い温度域において模擬橋梁を用いた施工試験を行った結果、防食性、乾燥性に問題は認められなかった。なお、施工対策として送風機による換気を行うことで、試験場内の揮発溶剤濃度を管理基準以下に保ち、結露の発生を抑えることができた。さらに、既設塗装の塗替えに対する耐久性を確認するため、実橋を用いた試験塗装を行った結果、外観や付着力は良好な結果となった。

キーワード：通年施工；寒冷地用塗料；耐久性；施工性；施工対策

1. はじめに

冬の低温時に塗装工事を行う場合、変性エポキシ樹脂塗料などの低温用塗料を適用しても、5℃以下での塗装は制限される。このため、以下のような問題が生じていた。

- 1) 一日の中で適温となる施工可能時間が夏期に比べ短いため、作業効率が低下する。
- 2) 適温確保のため、暖房機などを使用すると、夏期に比べてコスト増となり、CO₂排出量も増加する。
- 3) 上記の問題とも関連し、塗装工事は発注時期が春から夏にかけて集中し、繁忙期と閑散期が極端となる。

そこで、これらの問題を解決するため、イソシアネートでの重合反応硬化等により5℃以下の低温領域で硬化が可能となる寒冷地用塗料が開発された¹⁾。しかし、寒冷地用塗料の耐久性や施工性等の性能に関する検討は十分に行われていない。

このため、本研究では、室内促進劣化試験、実環境における暴露試験、模擬橋梁を用いた施工試験などを通して、寒冷地用塗料の耐久性、施工性、施工対策等を明らかにするための検討を行った。

2. 耐久性に関する検討

2. 1 試験概要

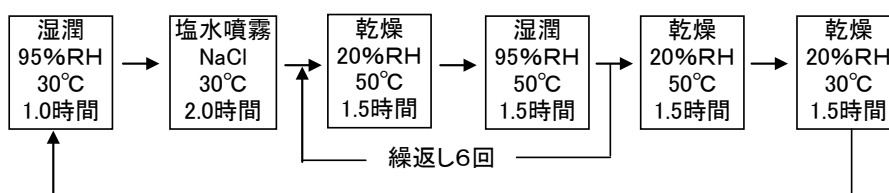
塗装系としての防食性を短時間で確認するため、室内促進劣化試験を行った。また、耐候性を確認するため、実環境における暴露試験を行った。

2. 1. 1 塗装仕様

試験開始時において入手可能な寒冷地用塗料を用いて、22仕様の試験を行った。塗装仕様を表-1に示す。また、寒冷地用塗料の性能と通常塗料の性能を比較するため、常温で通常塗料を用いた塗装仕様としてRe-Iをベンチマークとして採用した。なお、No. 1～6およびNo. 10～13は鋼道路橋防食便覧¹⁾



写真-1 試験板作成状況



1サイクル:24時間(1サイクル/1日)

図-1 室内促進劣化試験条件

表-1 塗装仕様

No	仕様名	1層目	2層目	3層目	4層目	5層目
	膜厚 (μm)	50	50	50	30(55 ^{※2})	25
1	ⅢP1	エポキシ下塗	エポキシ下塗	エポキシ下塗	ポリウレタン用中塗	ポリウレタン上塗
2	ⅢP2	エポキシ下塗	エポキシ下塗	エポキシ下塗	ポリウレタン用中塗	ポリウレタン上塗
3	ⅢP3	エポキシ下塗	エポキシ下塗	エポキシ下塗	ポリウレタン用中塗	ポリウレタン上塗
4	ⅢP4	エポキシ下塗	エポキシ下塗	エポキシ下塗	ポリウレタン用中塗	ポリウレタン上塗
5	ⅢP5	エポキシ下塗	エポキシ下塗	エポキシ下塗	ポリウレタン用中塗	ポリウレタン上塗
6	ⅢP6	湿気硬化形 ポリウレタン下塗	湿気硬化形 ポリウレタン下塗	湿気硬化形 ポリウレタン下塗	ポリウレタン用中塗	ポリウレタン上塗
7	ⅢAP1	湿気硬化形 ポリウレタン下塗	湿気硬化形 ポリウレタン下塗	湿気硬化形 ポリウレタン下塗	厚膜 ポリウレタン上塗	
8	ⅢAP2	エポキシ下塗	エポキシ下塗	エポキシ下塗	厚膜 ポリウレタン上塗	
9	ⅢAP3	エポキシ下塗	エポキシ下塗	エポキシ下塗	厚膜 ポリウレタン上塗	
10	ⅢS1	エポキシ下塗	エポキシ下塗	エポキシ下塗	シリコン変性 アクリル用中塗	シリコン変性 アクリル上塗
11	ⅢS2	エポキシ下塗	エポキシ下塗	エポキシ下塗	シリコン変性 アクリル用中塗	シリコン変性 アクリル上塗
12	ⅢS3	エポキシ下塗	エポキシ下塗	エポキシ下塗	シリコン変性 アクリル用中塗	シリコン変性 アクリル上塗
13	ⅢS4	エポキシ下塗	エポキシ下塗	エポキシ下塗	シリコン変性 アクリル用中塗	シリコン変性 アクリル上塗
14	ⅢF1	エポキシ下塗	エポキシ下塗	エポキシ下塗	ふっ素用中塗	ふっ素上塗
15	ⅢF2	エポキシ下塗	エポキシ下塗	エポキシ下塗	ふっ素用中塗	ふっ素上塗
16	I F1	有機ジungkリッチ ペイント	エポキシ下塗	エポキシ下塗	ふっ素用中塗	ふっ素上塗
17	I F2	有機ジungkリッチ ペイント	エポキシ下塗	エポキシ下塗	ふっ素用中塗	ふっ素上塗
18	I AF1	有機ジungkリッチ ペイント	湿気硬化形 ポリウレタン下塗	湿気硬化形 ポリウレタン下塗	厚膜 ふっ素上塗	
19	I AF2	有機ジungkリッチ ペイント	エポキシ下塗	エポキシ下塗	厚膜 ふっ素上塗	
20	I AF3	有機ジungkリッチ ペイント	エポキシ下塗	エポキシ下塗	厚膜 ふっ素上塗	
21	I AF4	有機ジungkリッチ ペイント	エポキシ下塗	エポキシ下塗	厚膜 ふっ素上塗	
22	I AS1	有機ジungkリッチ ペイント	エポキシ下塗	エポキシ下塗	厚膜シリコン変性 エポキシ上塗	
23	Rc- I (比較)	有機ジungkリッチ ペイント	エポキシ下塗	エポキシ下塗	ふっ素用中塗	ふっ素上塗

※1:塗料名はNo.23以外「寒冷地用」を省略

※2:厚膜塗料の場合の膜厚

に示されている塗装仕様である。

仕様名について、先頭文字の「Ⅲ」は素地調整程度3種(No. 1～15、以下「Ⅲシリーズ」)を、「Ⅰ」は素地調整程度1種(No. 16～22、以下「Ⅰシリーズ」)を想定しており、1層目に有機ジンクリッチペイントを用いるか用いないかで区別している。次に、2文字目以降のアルファベットは最上層に使用されている塗料を示しており、「P」はポリウレタン(以下「Pシリーズ」)、「S」はシリコン(以下「Sシリーズ」)、「F」はフッ素であり(以下「Fシリーズ」)、また、「AP」、「AS」、「AF」のように、それぞれのアルファベットの前に付いている「A」は中塗と上塗を兼用する「厚膜」仕様を意味している。また、名称の最後の数字は、塗料メーカーを区別する番号であるが、特定の数字が同一の塗料メーカーを表すものではない。例えば、「ⅢP1」と「ⅢF1」の塗料メーカーは異なる。

2. 1. 2 試験板

試験板はグリッドブラスト鋼板を用いた。また、試験板作成に当たっては、寒冷地用塗料の適用温度の下限目標である -5°C に設定した低温実験室内で、各塗料を塗料メーカーが推奨する希釈量で希釈し、規定の塗布量を電子天秤で測定しながら、はけで塗装した(写真-1)。塗装終了後は、 -5°C で7日間、続けて 23°C で2日間、合計9日間の養生を行った。

2. 1. 3 試験方法

(1) 室内促進劣化試験

複合サイクル腐食試験機を用いて、図-1に示すような塩水噴霧・乾燥・湿潤から構成される土木研究所式の試験サイクルを200サイクル与えた。

(2) 暴露試験

作成した試験板を美々コンクリート・凍害実験場(北海道苫小牧市)に5年間、暴露した。暴露状況を写真-2に示す。

2. 1. 4 評価項目

(1) 外観

目視観察にて、膨れ、さび、割れ、はがれなどの塗膜異状の有無を評価した。評価はASTM D-610、ASTM D-714に準じて行った。

(2) 膨れ幅

予め試験板に入れておいたカット部からの最大膨れ幅を測定した。評価は、通常塗装仕様である Rc-I の値と比較を行い、評価した。

(3) 付着力

塗膜の付着力をアドヒージョンテスターで測定し、



写真-2 暴露状況

表-2 付着力の評価方法

評価点	引張付着力(MPa)
0	$2.0 \leq X$
1	$1.0 \leq X < 2.0$
2	$0.0 < X < 1.0$
3	$X = 0.0$

表-3 色差の評価方法

評価点	色差
0	$\Delta E \leq 1.0$
1	$1.0 < \Delta E \leq 3.0$
2	$3.0 < \Delta E \leq 10.0$
3	$10.0 < \Delta E$



写真-3 仕様ⅢAP2の膨れ

付着力を測定した。付着力の評価方法として、鋼橋塗膜調査マニュアル²⁾では、表-2に示すような評価点方式が示されており、これに準じて評価を行った。

(4) 光沢保持率

光沢計を用いて、塗膜の水洗後の60度光沢度を測定し、光沢保持率を測定した。3点測定し、その平均値を測定値とした。評価は、通常塗装仕様である Rc-I の値と比較を行い、評価した。

(5) 色差

色差計を用いて、塗膜の水洗後のL*、a*、b*を測

定し、色差 (ΔE) を求めた。3点測定し、その平均値を測定値とした。なお、色差の評価方法として、鋼橋塗膜調査マニュアル²⁾では、表-3に示すような評価点方式が示されており、これに準じて評価を行った。

2. 2 試験結果

2. 2. 1 外観

室内促進劣化試験後の試験板について、目視観察

で膨れ、さび、割れ、はがれなどの塗膜異状の有無を評価した。カット部以外の一般部において、仕様ⅢAP2に若干の膨れ(写真-3)が確認されたが、その他の試験板では塗膜異状は認められず良好だった。

2. 2. 2 膨れ幅

室内促進劣化試験後の試験板の膨れ幅の測定結果を図-2に示す。なお、点線は比較となる通常塗装

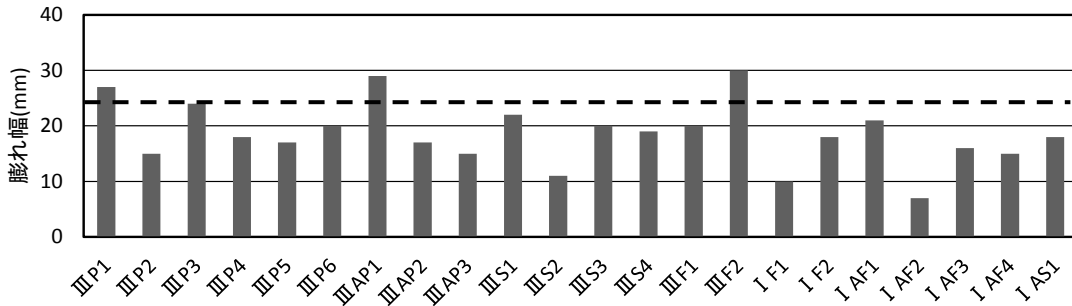


図-2 膨れ幅 (室内促進劣化試験)

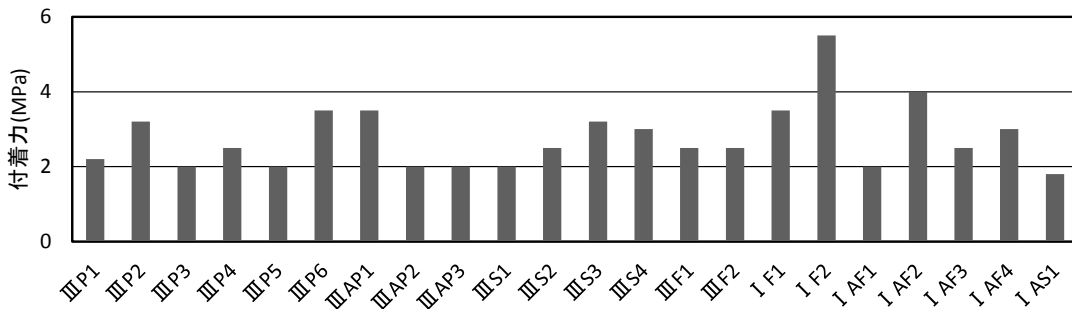


図-3 付着力 (室内促進劣化試験)

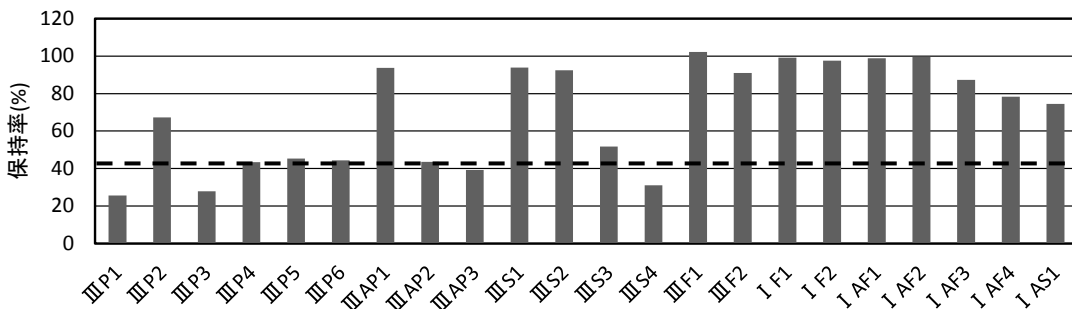


図-4 光沢保持率 (暴露試験)

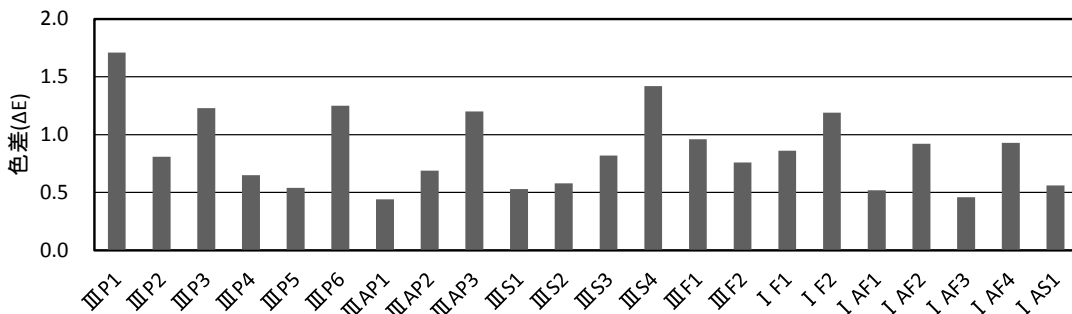


図-5 色差 (暴露試験)

仕様である Rc-I の値を示している。最下層に有機ジンクリッチペイントを使用している I シリーズについては、全ての仕様で、Rc-I の値を下回っていた。一方、III シリーズについては、いくつかの仕様で、Rc-I の値を上回るものが見られた。

2. 2. 3 付着力

室内促進劣化試験後の試験板の付着力の測定結果を図-3に示す。仕様 I AS1 を除く全ての試験板において、表-2に示す付着力評価基準で最も良い評価となる 2MPa 以上の付着力を確保していた。また、鋼板素地からの剥離は認められなかった。

2. 2. 4 光沢保持率

暴露5年後の試験板の光沢保持率を図-4に示す。なお、点線は比較となる通常塗装仕様である Rc-I の値を示している。上塗にふっ素を使用している F シリーズについては、全ての仕様で Rc-I の値を上回っていた。一方、P および S シリーズについては、いくつかの仕様で Rc-I の値を下回るものが見られた。

2. 2. 5 色差

暴露5年後の試験板の色差を図-5に示す。その結果、上塗にふっ素を使用している F シリーズについては、仕様 I F2 を除く全ての試験板において、表-3に示す色差評価基準で最も良い評価となる 1.0 以下の色差を確保していた。ただし、仕様 I F2 の値も 1.19 と 1.0 をわずかに上回っていた程度であった。一方、P および S シリーズについては、いくつかの仕様で、1.0 を上回るものが見られた。

3. 下限温度での施工性に関する検討

3. 1 試験概要

厳寒期を想定した氷点下の温度域における、寒冷地用塗料の施工性について確認するため、模擬橋梁を用いた施工試験を行った。

3. 1. 1 目標温度

図-6は、札幌における 1971~2000 年の平均気温の平年値³⁾を示している。この図より、厳寒期においても平均気温の平年値は-5℃以上であることから、今回の施工試験においては、寒冷地用塗料の施工温度の下限目標を-5℃に設定した。

3. 1. 2 模擬橋梁

施工試験に使用した模擬橋梁(写真-4)は、道内に架設されていた橋梁の架け替えに伴い、その一部を角山試験場(北海道江別市)に試験体として移設された後、床版等が設置されており、極めて実橋

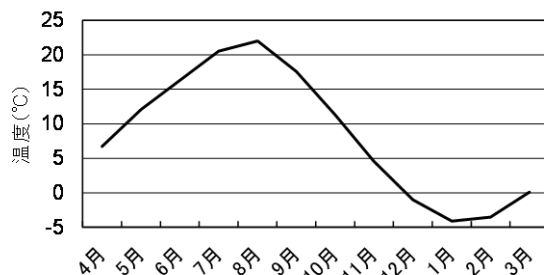


図-6 札幌の平均気温の平年値 (1971~2000年)



写真-4 模擬橋梁

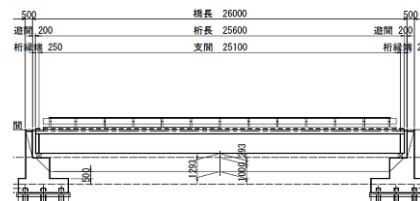


図-7 側面図

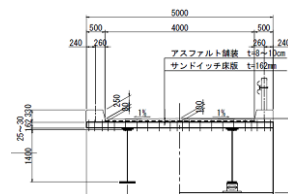


図-8 断面図

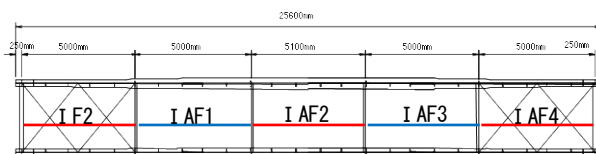


図-9 各仕様の塗装範囲



写真-5 養生状況

表-4 施工性の評価項目

管理項目	管理内容	評価
はけ作業性	Re-I 塗装系のそれぞれの塗料と作業性の比較 はけ塗りによる作業性（塗りやすさ、作業時間等）	○： 同等以上
		△： やや作業性が悪い
		×： 作業性が悪い
仕上がり外観	塗膜に以下の異状がないこと タレ・チジミ・ブラッシング・はじき・にじみ・ムラ ピンホール・すけ・ハケ目	○： 異状なし
		△： わずかに異状あり
		×： 異状あり
乾燥性	半硬化乾燥以上 各工程において翌日の半硬化乾燥状態以上を確認	○： 半硬化乾燥以上
		△： べたつき有
		×： 指触乾燥以下

表-5 施工性の評価結果

仕様名	作業性					外観					乾燥性				
	ジンク	下塗	下塗	中塗	上塗	ジンク	下塗	下塗	中塗	上塗	ジンク	下塗	下塗	中塗	上塗
I F2	○	△	△	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○
I AF1	○	△	△	-	△	○	△	○	-	○	○	○	-	○	
I AF2	○	○	△	-	△	△	○	○	-	○	○	○	-	○	
I AF3	○	○	○	-	○	△	○	○	-	○	○	○	-	○	
I AF4	○	△	○	-	○	○	○	○	-	○	○	○	-	○	

に近い状態となっている。形状等は図-7、8のとおりである。図-8に示す2本の桁のうち、片側の桁を施工対象とした。

3. 1. 3 塗装仕様

表-1に示す塗装仕様のうち、1層目に有機ジンクリッチペイント、上塗にふっ素を使用しているNo.17~21の5仕様の寒冷地用塗料を用いて、施工試験を行った。なお、各仕様の塗装範囲は、図-9に示すように、対傾構で分割された橋軸方向に5m程度の範囲である。

3. 1. 4 塗装方法

塗装作業は、はけ塗りにて行った。なお、塗装作業に用いる塗料の希釈調整については、各塗料の温度-粘度-希釈率曲線と塗装時の温度に基づき、各塗料メーカーの適性塗装粘度になるように希釈調整を行った。また、塗付量は各塗装仕様のWet数値をWetゲージにて確認しながら管理した。

また、塗装作業に先立ち、旧塗膜を除去するため、除せい度がSa2.5以上となるまで、ブラストによる素地調整を行った。なお、ブラストにて旧塗膜を除去

する際の飛散防止のため、実施工と同様に防護パネルを設置し、防護パネル内部には飛散防止シートを設置して、養生を行った(写真-5)。この養生は降雪等の影響を避けるための養生も兼ねている。

3. 1. 5 評価項目

施工性の評価は、表-4に示す項目について実施した。

3. 2 試験結果

施工性の評価結果を表-5に示す。なお、施工試験時の温度は概ね目標温度である-5℃程度となっていた。詳細については、6章で後述する。

3. 2. 1 作業性

表-5に示すように、いくつかの塗料で「やや作業性が悪い」という評価となった。具体的には、時間経過によって、はけさばきがやや重く、つっぱり感を感じるようになるというものであり、はけ塗り作業が困難となるほどのものではなかった。これは、寒冷地用塗料が低温状態における乾燥性向上のため、揮発の早い溶剤を用いていることに起因するものと推測される。

3. 2. 2 外観

表-5に示すように、ほとんどの塗料の外観は概ね良好であったが、一部の塗料で「はけ目」や「タレ」が見られた。具体的には、仕様 I AF3 の有機ジンクリッチペイントで若干の「はけ目」が、また、仕様 I AF2 の有機ジンクリッチペイント、I AF1 の下塗、I F2 の上塗で若干の「タレ」が見られた(写真-6)。しかし、いずれの仕様においても、所定の膜厚は確保されており、防食性には問題ないと考えられる。

3. 2. 3 乾燥性

表-5に示すように、すべての塗料において、乾燥性は良好であった。

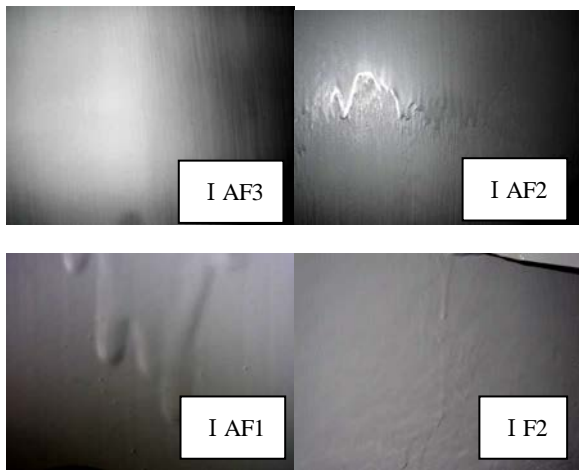


写真-6 外観異常の状況

4. 上限温度での施工性に関する検討

4. 1 試験概要

通常塗料が使用できなくなり、寒冷地用塗料の使用が想定される最低気温5℃を下回り始める向寒期や融雪期には、日中の気温が5℃を上回って、推移することが想定される。この場合、寒冷地用塗料の乾燥や硬化反応が早くなり、施工性の低下が懸念される。

そこで、気温が比較的高い施工環境での、寒冷地用塗料の施工性について確認するため、模擬橋梁を用いた施工試験を行った。

4. 1. 1 目標温度

施工試験を行った前年 11 月の一日の気温推移を図-10に示す。概ね 11 月中旬(11/10~20)頃に、日中の気温が5℃を下回るようになるが、最高気温は10℃程度となっている。このため、今回の施工試

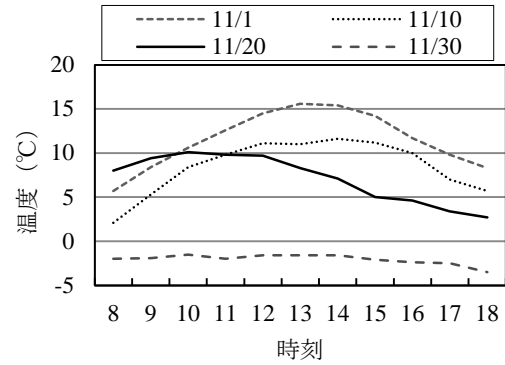


図-10 11月の一日の気温推移(江別、2011年)

表-6 塗装仕様

No	仕様名	塗料名
1	I F2 1層目	有機ジンクリッチペイント
2	I AF1 1層目	有機ジンクリッチペイント
3	I AF3 1層目	有機ジンクリッチペイント
4	I AF1 2,3層目	湿気硬化形ポリウレタン下塗
5	I AF2 2,3層目	エポキシ下塗
6	I AF4 2,3層目	エポキシ下塗
7	I F2 4層目	ふっ素用中塗
8	I F2 5層目	ふっ素上塗
9	I AF2 4層目	厚膜ふっ素上塗
10	I AF3 4層目	厚膜ふっ素上塗
11	I AF4 4層目	厚膜ふっ素上塗

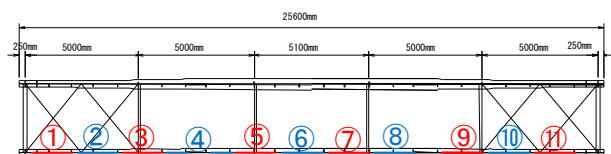


図-11 各仕様の塗装範囲

験では、施工中の目標温度を10℃に設定し、検討を行った。

4. 1. 2 模擬橋梁

施工試験では、3章で述べた模擬橋梁の桁のうち、未施工である反対側の桁を施工対象とした。

4. 1. 3 塗装仕様

表-1に示す塗装仕様のうち、表-6に示す各層の11種類の寒冷地用塗料を用いて試験を行った。また、区画分けについては、片側の桁の内側を、図-

11に示すように分割した。具体的には、各塗料の施工面積は、垂直補剛材を挟んだ2パネル分のウェブであり、幅2000mm×高さ1400mmである。この区画を希釈調整直後、1、2、3時間後の4回に分けて施工した。

4. 1. 4 塗装方法

塗装作業は、はけ塗りにて行った。塗装作業に用いる塗料の希釈調整については、各塗料の温度－粘度－希釈率曲線と塗装時の温度に基づき、各塗料メーカーの適性塗装粘度になるように希釈調整を行った。なお、1、2、3時間後に適性塗装粘度を外れた場合には、適性塗装粘度になるように、再度、希釈調整を行った。また、塗付量は各塗装仕様のWet数値をWetゲージにて確認しながら管理した。

塗装作業前の素地調整については、旧塗膜にさびがほとんどなかったため、図-11に示す④～⑩の区画については、素地調整程度4種とした。また、有機ジンクリッチペイントを塗装する①～③の区画については、素地調整程度1種とし、除せい度がSa2.5以上となるまで、ブラストによる素地調整を行い、旧塗膜を除去した。

4. 1. 5 評価項目

施工性の評価は、施工現場での塗料の使用時間が約2時間程度であることを考慮して、希釈調整直後、1、2、3時間後の4水準について、表-4に示す項目について実施した。

4. 2 試験結果

施工性の評価結果を表-7に示す。なお、施工試験時の温度については、図-12に示すとおり、桁の概ね中間位置のウェブに設置した温度計の測定結果では、概ね目標温度である10℃前後で推移した。

4. 2. 1 作業性

表-7に示すように、塗料No. 5、8は、試験途中でゲル化した。なお、各時間の塗装前に行った粘度測定の結果、塗料No. 5、8の粘度は、1時間後の時点で、すでに大きく上昇していた。この粘度上昇は、急速な硬化反応が進んでいることを示している。

次に、時間経過と共に「作業性」がやや低下した塗料について着目すると、1時間後では塗料No. 7、9、また、2時間後では塗料No. 2、4、6の作業性がやや低下した。なお、作業性の低下とは、はけさばきがやや重くなり、つっぱり感を感じるような

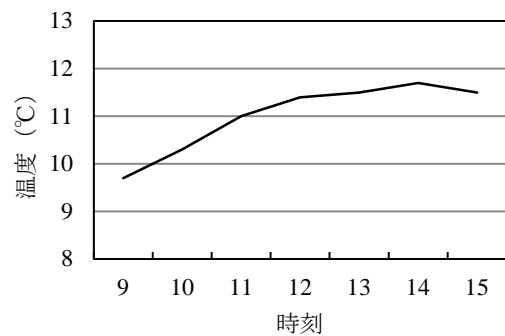


図-12 施工時の気温

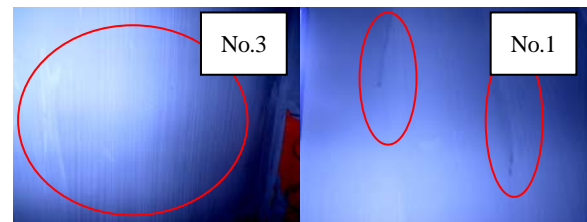


写真-7 外観異常の状況

表-7 施工性の評価結果

No	仕様名		作業性				外観				乾燥性			
			直後	1H	2H	3H	直後	1H	2H	3H	直後	1H	2H	3H
1	I F2	ジンク	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○
2	I AF1	ジンク	○	○	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○
3	I AF3	ジンク	○	○	○	○	△	△	△	△	○	○	○	○
4	I AF1	下塗	○	○	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○
5	I AF2	下塗	○	○	△	-	○	○	○	-	○	○	○	-
6	I AF4	下塗	○	○	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○
7	I F2	中塗	○	△	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○
8	I F2	上塗	○	△	-	-	○	○	-	-	○	○	-	-
9	I AF2	上塗	○	△	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○
10	I AF3	上塗	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11	I AF4	上塗	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

-: ゲル化による中止

ものであり、はけ塗り作業が困難となるほどではなかった。作業性低下の理由については、別途、検討を行う必要があるが、今回のような気温が比較的高い条件では、硬化反応や溶剤の揮発が、気温の低い場合に比べて早く進むことなどが考えられる。

4. 2. 2 外観

表-7に示すように、ほとんどの塗料において、「外観」は概ね良好であったが、塗料 No. 3、1では若干の「はけ目」や「タレ」が見られた。塗料 No. 3は、最終の塗装面である上塗りではなく、最下層に用いる有機ジンクリッチペイントであるが、写真-7に示すように、ややはけ目が目立つ傾向にあった。また、塗料 No. 1も、有機ジンクリッチペイントで、写真-7に示すように、希釈調整直後の時点においてのみ、若干のタレが生じていた。ただし、両塗料とも所定の膜厚は確保されており、防食性能には問題ないと考えられる。

4. 2. 3 乾燥性

表-7に示すように、すべての塗料において、塗装した1時間後には半硬化乾燥状態になっており、乾燥性に問題は認められなかった。

5. 揮発溶剤への施工対策に関する検討

5. 1 試験概要

寒冷地用塗料中には、乾燥性向上のため、トルエンなどの蒸発の早い溶剤が含まれている。したがって、養生シート等により密閉構造となっている作業場内では、作業安全性を確保するため、揮発溶剤への施工対策が必要となる。

そこで、揮発溶剤への施工対策として、送風機による換気の有効性を確認するため、模擬橋梁での施工試験を行った。

5. 1. 1 模擬橋梁

施工試験では、3章で述べた模擬橋梁のうち、図-13に示す対傾構で分割された2区画を用いて、施工試験を行った。なお、施工箇所については、密閉構造とするため、コンパネとシートによる養生を行った（写真-8）。

5. 1. 2 試験時期

試験時期に関しては、気温が比較的高く溶剤の揮発量が多いと推定される11月中旬に、4章で述べた上限温度での施工性の検討と合わせて実施した。

5. 1. 3 塗装方法、塗料

寒冷地用塗料を用いた施工で生じる溶剤の揮発量等を再現するため、実施工と同様に、模擬橋梁の桁

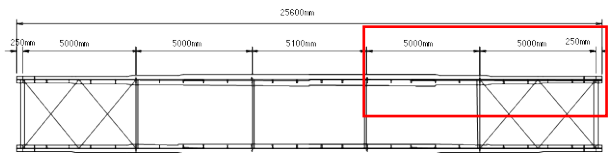


図-13 施工試験の実施区画



写真-8 養生状況



写真-9 ガス検知器



写真-10 送風機

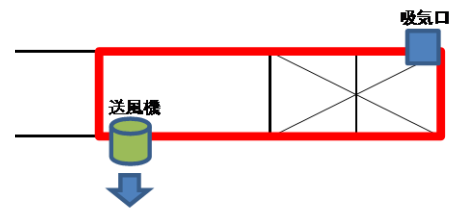


図-14 送風機の設置位置

を対象として、寒冷地用塗料の塗装作業を行った。塗装作業は、はけ塗りにて行い、塗料は寒冷地用有機ジンクリッチペイントを用いた。これは、予備検討⁴⁾の結果、寒冷地用塗料のうち、寒冷地用有機ジンクリッチペイントの溶剤発生量が最も多かったためである。なお、塗装作業に用いる塗料の希釈調整については、各塗料の温度-粘度-希釈率曲線と塗装時の温度に基づき、各塗料メーカーの適性塗装粘

度になるように希釈調整を行った。

5. 1. 4 測定項目

小型自動吸引式のガス検知器（写真－9）を用いて、場内に発生するトルエンの揮発溶剂量の測定を行った。測定箇所は作業場内のほぼ中間位置とし、測定高さは作業環境測定方法の基準⁵⁾に準じて、床面から 500 mm の位置で測定を行なった。なお、測定を行う揮発溶剤としてトルエンを選定したのは、予備検討⁴⁾の結果、18 項目の含有溶剤のうち、管理基準濃度 20ppm⁵⁾を超えたのはトルエンのみであったためである。

5. 1. 5 施工対策

揮発溶剤への施工対策として、送風機による換気を行った（写真－10）。送風機の機種選定に当たっては、試験場内の空体積を算出し、計算上、試験場内の空体積が約 1 分間で換気できる送風能力のある機種を選定した。また、爆発事故防止のため、防爆型構造の機種を選定した。

送風機の設置位置については、塗装作業時の動線等を考慮し、図－14 に示すように試験場内の隅角部付近に設置して、場内の空気を排気する形とした。外気の取り入れは送風機を設置した対角の養生用シートを開放して吸気口とする、自然流入方式とした。

揮発溶剂量の測定は同一区画、方法で、送風機を使用しない場合と使用する場合の 2 回実施した。具体的には、1 回目については、送風機を使用しない状態で塗装を行い、作業場内の溶剤ガスの上昇傾向、溶剤濃度等のデータを収集した（以下、「対策なし」）。次に、2 回目については、送風機を使用する状態で塗装を行い、作業場内の溶剤濃度等のデータを収集した（以下、「対策あり」）。なお、送風機の稼働については、送風機による換気の有効性を確認するため、

塗装開始後、ガス検知器の表示濃度がトルエンの管理濃度である 20ppm に達した時点で送風機を稼働させた。

5. 2 試験結果

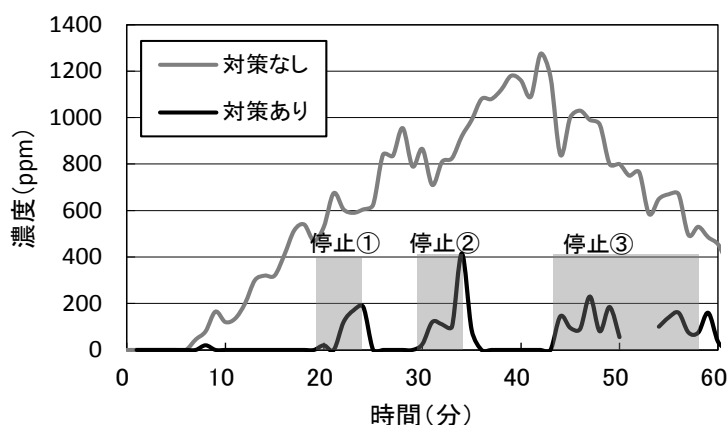
5. 2. 1 対策なし

「対策なし」の場合の濃度測定結果を図－15 の灰色実線で示す。濃度は塗装開始後しばらくの間、ほぼ 0 ppm であったが、8 分経過後から急激に濃度が上昇し始めた。その後も濃度の上昇は続き、塗装が終了した 40 分後には 1160ppm、42 分後には最大値の 1275ppm に達した。この数値はトルエンの管理濃度 20ppm の 60 倍を越す濃度であり、作業者がこの環境下に長時間晒されると、有機溶剤中毒の発症が懸念される。なお、濃度上昇中に一時的に濃度が低下している部分が数箇所あるが、これは場内の測定者の移動により、場内の空気が攪拌され、測定位置での濃度が一時的に下がったためと推測される。

5. 2. 2 対策あり

「対策あり」の場合の濃度測定結果を図－15 の黒色実線で示す。濃度は塗装開始後しばらくの間、ほぼ 0 ppm であったが、8 分経過後に管理濃度である 20ppm に達したため、送風機を稼働させた。送風機稼働 1 分後には 0 ppm となり、計算どおり、試験場内の空体積が約 1 分間で換気でき、送風機の有効性が確認された。

さらに送風機の有効性を確認するため、図－15 の網掛け部分に示すように、3 回にわたり、送風機を一時的に停止し、濃度を管理濃度である 20ppm よりも高めた状態から、適切な換気が可能となるか検証を行った。まず、18～24 分（停止①）については、24 分の時点で管理濃度の約 10 倍程度である 185ppm に達した後、送風機を再稼働させた。その結果、1



図－15 濃度測定結果

分後には0ppmとなった。次に、28～34分（停止②）については、34分の時点で管理濃度の約20倍程度である415ppmに達した後、送風機を再稼働させた。その結果、2分後には0ppmとなったが、1分後では85ppmであり、計算上、試験場内の空体積が換気される1分間では、完全には換気できなかった。また、43分以降（停止③）については、「対策なし」の濃度は減少方向に向かっているが、送風機を停止すると、管理濃度20ppmを超えて、管理濃度の10倍である200ppm程度に達した。

以上のことから、管理基準を大幅に超えるような高濃度の状態であっても、送風機を使用することにより、場内の溶剤ガスを全量排気することは可能であるが、計算上の換気時間よりも多くの時間を要する。また、塗装終了後であっても、塗料の乾燥に伴い、溶剤はしばらくの間、揮発し続け、管理濃度を超える可能性があることが明らかとなった。したがって、揮発溶剤に対する作業安全性を確保するためには、作業中は恒常的に送風機を稼働させ、作業終了後においても、しばらくの間は稼働させておくことが必要である。

6. 結露への施工対策に関する検討

6. 1 試験概要

氷点下の温度域では飽和水蒸気量が極端に少なく、作業員などから発生する水蒸気などにより、容易に高湿度となるため、結露が発生し、塗膜異常につながる恐れがある。

そこで、結露への施工対策として、送風機による換気の有効性を確認するため、模擬橋梁での施工試験を行った。

6. 1. 1 試験時期、模擬橋梁、塗装方法等

試験時期に関しては、結露発生の可能性が高くなる氷点下の温度域で施工試験を行うため、年間の平均気温が最も低くなる1月下旬に実施した。なお、本試験は、3章で述べた下限温度での施工性の検討と合わせて実施したものであり、施工対象とした模擬橋梁、シート等による養生条件、塗装仕様、塗装方法は3章で述べたとおりである。

6. 1. 2 測定項目、測定部位、測定断面

結露の発生を把握するため、温度、湿度、鋼材温度等の測定を行った。部位により、温度や湿度などの変化の程度が異なることが想定されたため、図-16に示すように、測定部位については、桁の内側と外側のウェブ、上フランジおよび下フランジ下面を

対象とした。また、測定断面は桁の概ね中間位置に設定した。

6. 1. 3 測定方法

1) 外気温度、外気湿度

現地の外気温度、外気湿度を測定するため、模擬橋梁の直近に設置した仮設小屋を利用し、降雪の影響のない小屋の軒下に温湿度センサーを設置した。なお、データロガー（本体部）は仮設小屋の中に設置した。

2) 温度、湿度、鋼材温度

各部位の温度、湿度を測定するため、超小型温湿度センサーを各部位の鋼材面直近に設置した。あわせて、鋼材温度センサーを設置した。

3) 結露

氷点下における結露は外観目視では、見づらく、把握しにくいことが想定されたため、調査箇所直近に薄いステンレス板を設置し、なるべく結露を見やすくするようにして、外観目視を行った。

6. 2 試験結果

3章で述べたように、今回用いた寒冷地用塗料の塗装工程は最大5層である。今回の施工試験では、実施工を意識し、一日一層の施工を行うこととし、施工期間は年間の気温が最も低くなる時期である1月下旬の5日間（1/23～1/27）とした。

今回の施工試験において、調査を行った部位のうち、「桁内側の上フランジ」が結露環境として最も厳しい条件であったため、以下では「桁内側の上フランジ」に関して、検討を行った結果について述べる。「桁内側の上フランジ」の温度、湿度等の施工期間中の計測データを図-17に示す。また、日付毎の天気、最低・最高温湿度の値などを表-8に示す。なお、図中の赤い網掛けは、結露環境の目安となる「鋼材温度－露点」の値がマイナスになっている部分を示し、また、緑の点線は前日に施工した塗膜の乾燥状態などの調査開始時刻を示し、オレンジの点線は塗装作業開始時刻と終了時刻を示している。以下で

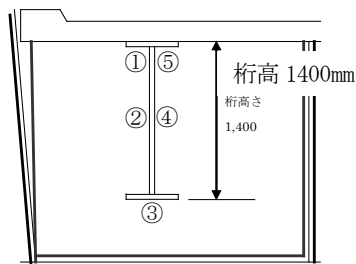


図-16 温度、湿度、鋼材温度等の測定部位

は、調査開始時刻から塗装作業開始時刻までを「調査時間帯」、塗装作業開始時刻から終了時刻までを「施工時間帯」と呼ぶこととする。

送風機に関しては、基本的に施工時間帯のみ稼働することとし、調査時間帯や作業を行わない時間帯は稼働を停止した。

6. 2. 1 温度、鋼材温度

図-17および表-8に示すように、外気の1日の温度変化は、1/23と1/24を除き、概ね日の出前の6～7時頃に最低温度となり、日の出以降は、日射の影響を受け、急速に温度が上昇し、概ね正午前後に最高温度となり、日没前の14～15時頃から温度が低下するといったサイクルを繰り返している。

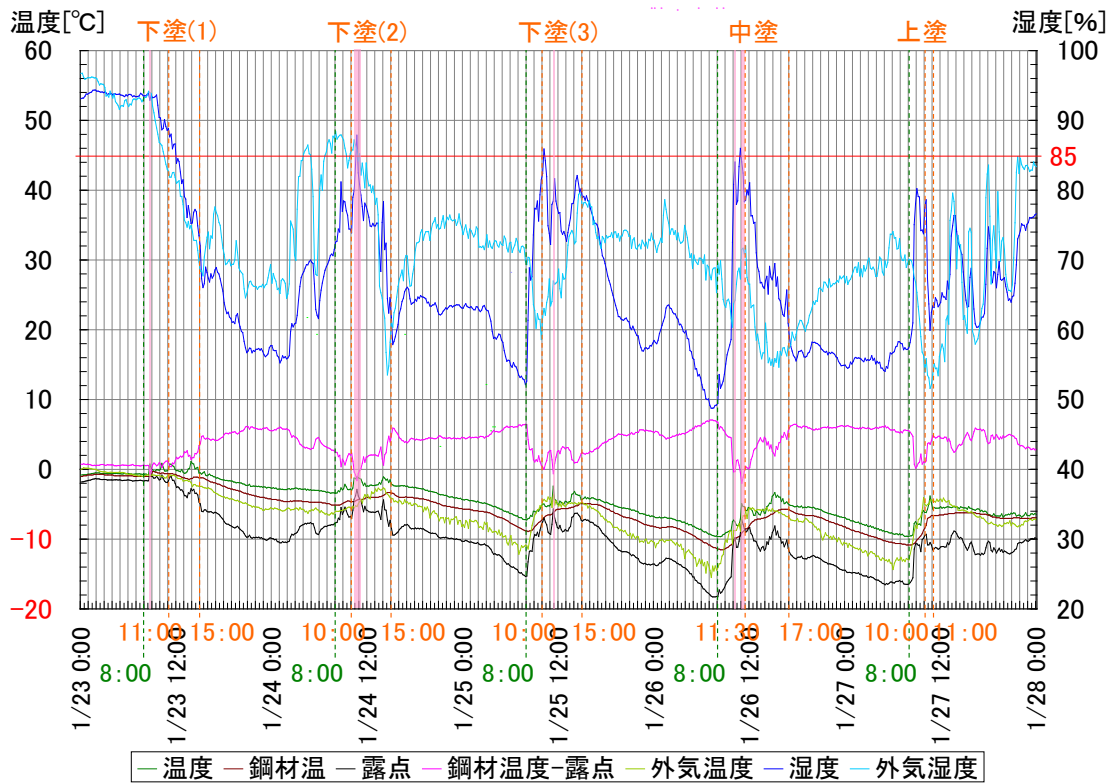


図-17 施工期間中の温度、湿度などの計測データ（上フランジ）

表-8 施工期間中の最低・最高温度湿度などに関する一覧表

日付	1月23日	1月24日	1月25日	1月26日	1月27日	
天気※	雪	雪のち晴	晴	晴	晴	
施工時間	8:00 ~ 15:00	8:00 ~ 15:00	8:00 ~ 15:00	8:00 ~ 17:00	8:00 ~ 11:00	
温度	外気	-5.8 ~ 0.3 (23:00) (0:20)	-8.1 ~ -2.6 (23:50) (14:00)	-12.1 ~ -3.6 (7:00) (11:20)	-15.4 ~ -5.4 (7:10) (14:10)	-14.3 ~ -4.0 (6:00) (9:50)
	場内	-2.7 ~ 1.1 (23:20) (13:50)	-4.3 ~ -1.1 (23:50) (14:00)	-7.2 ~ -2.4 (8:00) (11:20)	-9.6 ~ -3.3 (8:00) (15:10)	-9.6 ~ -3.8 (7:30) (10:40)
	うち施工中	-0.7 ~ 1.1 (8:20) (13:50)	-3.4 ~ -1.1 (8:00) (14:00)	-7.2 ~ -2.4 (8:00) (11:20)	-9.6 ~ -3.3 (8:00) (15:10)	-9.6 ~ -3.8 (8:00) (10:40)
	鋼材	-4.2 ~ -0.3 (23:30) (9:00)	-5.6 ~ -3.3 (23:30) (14:30)	-8.9 ~ -4.9 (8:10) (14:40)	-11.5 ~ -5.7 (8:20) (16:00)	-10.8 ~ -6.2 (7:40) (13:50)
	うち施工中	-1.4 ~ -0.3 (13:30) (9:00)	-5.1 ~ -3.3 (8:00) (14:30)	-8.9 ~ -4.9 (8:10) (14:40)	-11.5 ~ -5.7 (8:20) (16:00)	-10.8 ~ -6.6 (8:00) (10:50)
湿度	外気	65% ~ 97% (20:40) (0:10)	54% ~ 88% (14:30) (8:00)	59% ~ 80% (9:50) (14:40)	55% ~ 79% (15:40) (1:20)	52% ~ 85% (10:40) (21:40)
	場内	56% ~ 94% (23:10) (1:50)	55% ~ 88% (1:00) (10:40)	52% ~ 86% (7:50) (10:10)	49% ~ 86% (7:20) (10:50)	54% ~ 80% (5:00) (9:00)
	うち施工中	72% ~ 94% (15:00) (8:30)	62% ~ 88% (15:00) (10:40)	53% ~ 86% (8:00) (10:10)	49% ~ 86% (8:00) (10:50)	57% ~ 80% (8:00) (9:00)

※天気は施工時間中のもの

また、場内の1日の温度変化は、外気温度と連動する傾向が見られるが、その変化の程度は外気温度よりも緩やかであり、変動幅は外気温度よりも小さい。例えば、日没前から日の出前の温度が低下する時間帯においては、場内温度の方が外気温度よりも温度の低下幅が小さいため、場内温度は外気温度よりも高めに推移する傾向がある。

一方、施工時間帯の場内温度も、外気温度と同様に、日射の影響を受けるため、上昇するはずであるが、施工時間帯には送風機で場内温度よりも温度の低い外気を取り入れているため、場内温度は、さほど上昇できず、外気温度に近づくような温度変化となっている。

なお、鋼材温度は概ね場内の温度と連動して変化し、施工中は場内温度よりも約0～2℃くらい低い温度となっていた。

6. 2. 2 湿度

図-17より、外気の1日の湿度変化は、1/23と1/24を除き、ばらつきはあるものの、日没前からの温度低下に伴い、湿度が上昇し、朝方まで湿度が高い状態が続き、日の出以降は、気温の上昇と共に、湿度が低下するといったサイクルを繰り返している。なお、1/23と1/24において、外気湿度が85%以上の高湿度となっている時間帯があるのは、降雪のためである。次に、場内湿度は、調査時間帯においては、最低温度に近い時間帯であり、調査員が発する水蒸気が発生するため、調査開始時刻を示す緑点線を境に急激に湿度が上昇している。

一方、施工時間帯の場内湿度は、送風機で相対的に湿度の低い外気を取り入れているため、ばらつきはあるものの、場内湿度は低下する。しかし、1/25、1/26、1/27の時のように、施工時間帯の場内温度が-5℃程度の場合、外気温度と場内温度がほぼ同じでも、場内湿度は外気湿度と同程度となるまでは低下せず、外気湿度よりも5～15%程度、高くなる。したがって、送風機によって結露対策を行う場合、1/23の11:00～12:00の時のように、外気湿度が塗装制限湿度である85%を下回っていても、場内湿度は85%以下とならない場合があるので、注意を要する。

なお、上記の傾向とは逆に、1/24には、施工時間帯の場内湿度が外気湿度を下回っている。これは場内温度が外気温度よりも高いためであると考えられる。

また、施工時間帯中の1/24の10:30頃と1/25の11:30頃に、場内湿度が急上昇し、結露環境の目安

となる「鋼材温度-露点」が一時的にマイナスとなっているのは、溶剤濃度計測のため、一時的に送風機の稼働を停止したためである。

6. 2. 3 結露

結露環境の目安となる「鋼材温度-露点」がマイナスとなっていたのは、一時的に送風機を停止した1/24と1/25を除くと、調査時間帯である1/23の9:00頃と1/26の10:00～11:00頃であり、実際に結露・結氷も生じていた。

1/23については、深夜から朝方にかけての降雪に加えて、外気温度も0～-1℃付近と、年間の気温が最も低くなる時期としては、比較的高い温度で推移しており、外気、場内ともに、湿度は90%を超える高湿度状態であった。そのため、調査を開始する前から上フランジに結露・結氷が生じていた。

また、1/26については、調査開始時点の場内温度は-9℃で、鋼材温度は-11℃と今回の施工試験において、最も低い温度であることに加え、調査時間帯は送風機を停止していたため、急激に場内湿度が上昇し、写真-11に示すように、極めて短時間で上フランジ結氷が生じた。このように、-5℃を下回るような極めて低い温度の場合、飽和水蒸気量が極端に少なくなるため、作業員の呼気等に含まれる水蒸気により、急激に場内湿度が上昇し、極めて短時間で結露環境となり、結露・結氷を生じる場合があるので、注意が必要である。

上記の1/23と1/26以外では、施工期間中、結露・結氷の発生は認められず、特に施工時間帯においては、送風機で相対的に湿度の低い外気を取り入れることにより、塗装制限湿度である85%以下の状態を保つことができ、「鋼材温度-露点」は結露環境にない状態を示すプラスの値を保持することができた。

以上のことから、-5℃を下回るような極めて低い温度の場合や送風機を用いても場内湿度が85%以上となるような外気が高湿度の場合に注意する必要があるが、実施工においても、送風機を用いること



写真-11 上フランジの結氷状況

により、塗膜性能や施工に影響を及ぼすような結露の発生を抑えることが可能となり、低温下における結露対策として送風機が有効であることを確認できた。

7. 実橋を対象とした既設塗装の塗替えに関する検討

7. 1 試験概要

実橋における寒冷地用塗料の耐久性を確認するため、既設塗装の塗替えを想定し、実橋を用いた試験塗装を行った。

7. 1. 1 対象橋梁

対象橋梁は、A 塗装系（油性さび止めペイント/フタル酸樹脂塗料）の I 橋と C 塗装系（無機ジंकリッチペイント/エポキシ樹脂塗料/ふっ素樹脂塗料）の H 橋である。表-9 に各橋梁の諸元等を示す。

I 橋は前回の塗装から約 7 年、H 橋は前回の塗装から約 16 年経過している。

試験塗装範囲は桁内側のウェブであり、表-9 の写真中の赤矢印で示す部分である。

7. 1. 2 塗装仕様

表-1 に示す塗装仕様のうち、3 章において下限温度での施工性が確認されている No. 17~21 の 5 仕様を試験塗装に用いた。また、鋼道路橋防食便覧¹⁾ に示されている塗装仕様である No. 4 の仕様についても、あわせて試験塗装に用いた。なお、塗替え塗装であるため、No. 17~21 については、各仕様の 1 層目に有機ジंकリッチペイントではなく、2 層目の下塗塗料を使用した。

7. 1. 3 塗装方法

塗装作業は、はけ塗りにて行った。なお、塗装作業に用いる塗料の希釈調整については、各塗料の温度-粘度-希釈率曲線と塗装時の温度に基づき、各塗料メーカーの適性塗装粘度になるように希釈調整を行った。また、塗付量は各塗装仕様の Wet 数値を Wet ゲージにて確認しながら管理した。

塗装作業前の素地調整については、旧塗膜にさびがほとんどなかったため、素地調整程度 4 種とした。

7. 1. 4 評価項目

既設塗装の塗替えに対する耐久性を確認するため、塗装から 7 ヶ月後に、外観と付着力について評価を実施した。

7. 2 試験結果

7. 2. 1 外観

各橋梁のいずれの塗装仕様においても、割れ、は

表-9 対象橋梁の諸元



橋梁名	I 橋	H 橋
		
架設年月	1986年11月	1998年3月
橋梁形式	鈹桁	鈹桁
橋長	230.0m	127.2m
幅員	9.5m	13.6m
桁高	2.0m	2.0m
塗装年月	2006年10月	1998年3月
塗装系	Ra-III	C-4

表-10 付着力

No	仕様名	I橋 (MPa)	H橋 (MPa)
17	I F2	2.0	2.0
18	I AF1	2.5	1.5
19	I AF2	3.5	1.5
20	I AF3	3.0	2.5
21	I AF4	3.0	3.0
4	III P4	4.0	3.0

がれ、膨れ等の異状は見られなかった。

7. 2. 2 付着力

付着力の測定結果を表-10 に示す。ほとんどの仕様で表-2 に示す付着力評価基準で最も良い評価となる 2 MPa 以上の付着力を確保していた。また、2 MPa を下回った No.18、19 の仕様についても、1.5MPa と高い値を示しており、鋼板素地からの剥離は認められず、いずれも接着剤での剥離であった。

8. まとめ

室内促進劣化試験、実環境における暴露試験、模擬橋梁を用いた施工試験などを通して、寒冷地用塗料の耐久性、施工性、施工対策等を明らかにするための検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 室内促進劣化試験および実環境における暴露試験の結果、最下層に有機ジंकリッチペイント、上塗にふっ素を使用している仕様については、膨れ幅、付着力、光沢保持率、色差が通常塗装仕様である Rc-I と同等以上、ま

たは、一般的な塗膜評価基準で最も良い評価となり、防食性や耐候性などの耐久性については良好な結果であった。

- (2) 氷点下および気温が比較的高い温度域において、模擬橋梁を用いた施工試験を行った。その結果、作業性については、一定時間をすぎると、作業性がやや低下した塗料が見られたが、はけ塗り作業が困難となるような著しい作業性の低下は見られなかった。また、仕上がり外観については、一部の塗料で若干の「はけ目」や「タレ」が見られたが、所定の膜厚は確保されており、防食性には問題ないと考えられる。また、乾燥硬化性については、すべての塗料において、問題は認められなかった。
- (3) 揮発溶剤および結露への施工対策として、送風機による換気の有効性を確認するため、模擬橋梁での施工試験を行った。その結果、試験場内の空体積に対応した送風能力を持つ送風機を用いることで、試験場内の揮発溶剤濃度を管理基準以下に保つことができた。また、 -5°C を下回るような極めて低い温度の場合や送風機を用いても場内湿度が85%以上となるような外気が高湿度の場合には、注意が必要であるが、送風機の使用により、相対的に湿度の低い外気を取り込むことで、結露の発生を抑えることが可能であった。
- (4) 既設塗装の塗替えに対する耐久性を確認するため、実橋を用いた試験塗装を行った。その結果、塗装から7ヶ月後の外観や付着力は良好な結果となった。

謝辞

実橋を用いた検討の実施に当たっては、北海道開発局札幌開発建設部札幌道路事務所および千歳道路事務所の方々に多大なご協力、ご支援をいただきました。この場をお借りして、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鋼道路橋防食便覧、公益社団法人日本道路協会、平成26年3月
- 2) 鋼橋塗膜調査マニュアル JSSIV03-1996、社団法人日本鋼構造協会、平成18年10月
- 3) 気象庁ホームページ
- 4) 石田博文ほか：寒冷地用塗料の発生溶剤管理に関する

検討、第36回鉄構塗装討論会予稿集、pp. 37-52、2013年10月

- 5) 有機溶剤作業主任者テキスト第4版、中央労働災害防止協会、平成25年2月
- 6) 林田宏ほか：寒冷地用塗料施工時の結露対策に関する検討、第35回鉄構塗装討論会予稿集、pp. 55-66、2012年10月