

## 1. 目的

熱容量の大きい床版に接する箱桁内部の上フランジ面は、日中の輻射熱によって箱桁内部が温められても上フランジ面の温度上昇が他の部位に比べて遅れるため、結露の発生しやすい部位であることが報告されている。

この結露を抑制するためには、断熱塗料を箱桁内部の上フランジ面に塗装し、床版への熱伝導を抑制することが有効であると考えられる。

これを踏まえ、本試験は、市販の断熱塗料に比べて低コストかつ市販の一般塗料に断熱効果を付与できる『断熱粒素ヒートカットパウダー(以後、HCP)』を箱桁内部のD-5系塗料(変性エポキシ樹脂塗料)に混合し、その断熱塗料の施工性、結露抑制効果、塗膜付着力等について確認する。

## 2. HCPの概要



- ・セラミック100%の真空中空構造の粒素
- ・水性、油性を問わず、市販の一般塗料に混ぜ込むだけで断熱効果の付与が可能
- ・断熱性能はHCPの混合密度(重量比で塗料の15~20%程度推奨)や塗膜厚に比例して向上
- ・耐久性能はベースとなる塗料の性能に依存
- ・HCP自体の特性や耐久性能は半永久的に持続

### 3. 試験内容および試験結果

#### 3-1 ドライ膜厚推定用試験および施工性・外観の確認

HCPを混合した変性エポキシ樹脂塗料による断熱塗装(以下、断熱塗装)のウェット膜厚からドライ膜厚を推定するための試験を行い、同時に施工性・外観の確認を行う。

##### (1) 塗装仕様

本試験の塗装仕様を表-1に示す。

表-1 塗装仕様

塗装区分	塗装工程	塗料名	塗装方法
断熱塗装	第1層	ヒートカットパウダーを混合した変性エポキシ樹脂塗料内面用	エアレス

##### (2) 試験ケース

本試験の試験ケースを表-2に示す。

表-2 試験ケース

試験体番号	HCP混合量 (重量比)	試験体数
W-15-1~4	15%	4
W-20-1~4	20%	4

※各試験ケースの試験体ごとに塗料の吹き付け量を変化させる。

##### (3) 試験体形状

本試験の試験体形状を図-1に示す。

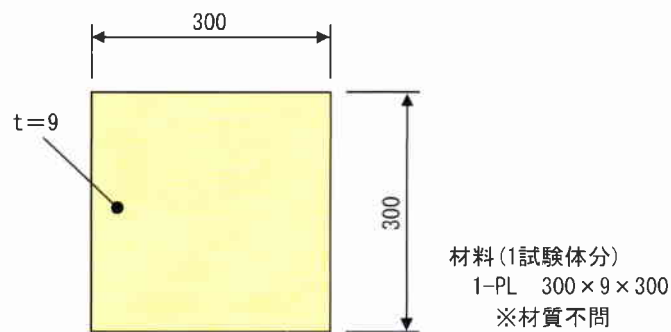


図-1 試験体形状

(4) ウェット・ドライ膜厚の測定結果およびドライ膜厚の推定式

各試験体のウェット膜厚とドライ膜厚の測定結果を表-3、図-2に示す。

表-3 測定結果

試験体番号	ウェット膜厚 (μm)	ドライ膜厚 (μm)
W-15-1	500	360
W-15-2	900	670
W-15-3	1000	870
W-15-4	1250	770
W-20-1	900	670
W-20-2	1000	670
W-20-3	1000	770
W-20-4	1250	870

← イレギュラー値？

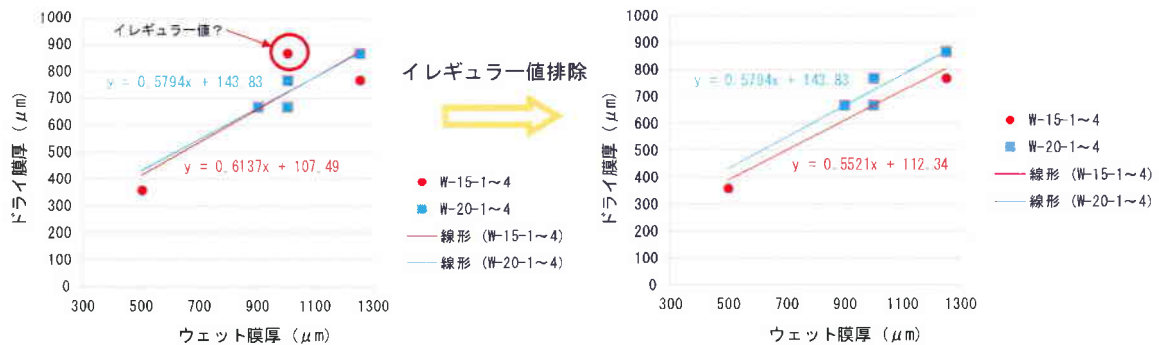


図-2 測定結果と近似線形

図-2の近似線形(イレギュラー値排除後)より、HCPを混合した変性エポキシ樹脂塗料のドライ膜厚は下式を用いて推定できる。

- ・ HCP15%混合(重量比)

$$\text{ドライ膜厚}(\mu\text{m}) = \text{ウェット膜厚}(\mu\text{m}) \times 0.6 + 110 \mu\text{m}$$

- ・ HCP20%混合(重量比)

$$\text{ドライ膜厚}(\mu\text{m}) = \text{ウェット膜厚}(\mu\text{m}) \times 0.6 + 140 \mu\text{m}$$

(5) 施工性・外観の確認結果

HCPを重量比15~20%混合することで、通常の変性エポキシ樹脂塗料よりも粘性は高くなるが、施工性に問題はなかった。ただし、スプレーガンのフィルターにHCPが詰まるため、実施工時には小まめに交換・清掃が必要(1ブロックで3回程度の交換を想定)となる。

塗装完了後の外観は、通常の変性エポキシ樹脂塗料とほとんど変わらなかった(よく見ると多少のまだら感はある)。

(6) 状況写真



写真-1 試験体作成状況



写真-2 ウェット膜厚の測定状況



写真-3 HCP15%混合試験体の外観



写真-4 HCP20%混合試験体の外観

3-2 結露抑制効果確認試験

断熱塗装の結露抑制効果を確認する。

(1) 塗装仕様

D5塗装の仕様変更扱いとなることを避けるため、D5塗装面に断熱塗装を塗り重ねる仕様とする。本試験の塗装仕様を表-4に示す。

表-4 塗装仕様

塗装区分	塗装工程	塗料名	塗装方法	目標膜厚(μm)		
D5塗装	2次素地調整	動力工具処理 ISO St3	—	—		
	第1層	変性エポキシ樹脂塗料内面用	エアレス	120		
	第2層	変性エポキシ樹脂塗料内面用	エアレス	120		
断熱塗装	第3層	ヒートカットパウダーを混合した変性エポキシ樹脂塗料内面用	エアレス	400	500	600

## (2) 試験ケース

本試験の試験ケースを表-5に示す。

表-5 試験ケース

試験体番号	HCP混合量 (重量比)	断熱塗料 の目標膜厚	試験体数
D-0-1~3	D5塗装のみ		3
D-15-400-1~3	15%	400 $\mu$ m	3
D-15-500-1~3		500 $\mu$ m	3
D-15-600-1~3		600 $\mu$ m	3
D-20-400-1~3	20%	400 $\mu$ m	3
D-20-500-1~3		500 $\mu$ m	3
D-20-600-1~3		600 $\mu$ m	3

## (3) 試験体形状

試験体形状は3-1(3)と同じ。

## (4) 試験方法

高湿度環境に設定(加湿器を使用)した空間内に試験体を設置(両端を盤木で支持)し、試験体の上面を冷却したエタノール入りペットボトル(1.5リットル)で1時間冷やして試験体下面に結露を強制的に発生させる。その状態で結露の発生状況を観察する。なお、試験体は各試験ケースの目標膜厚(断熱塗装)を確保したものの中から各1体を選定する。結露抑制効果の確認方法イメージを図-3に、試験状況を写真-5に示す。

加湿器によって高湿度環境に設定した密閉空間内

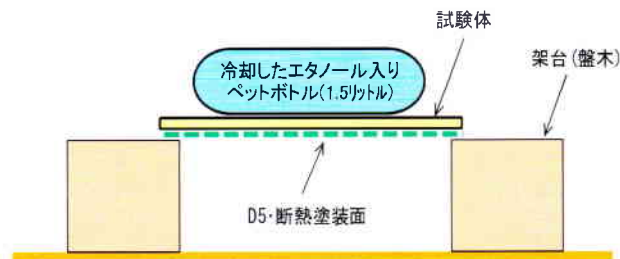


図-3 結露抑制効果の確認方法イメージ



写真-5 試験状況

### (5) 試験結果

各試験ケースにおける膜厚測定の結果と各試験ケースの代表試験体(断熱塗装の目標膜厚を確保している試験体)における結露の発生状況を表-6に示す。

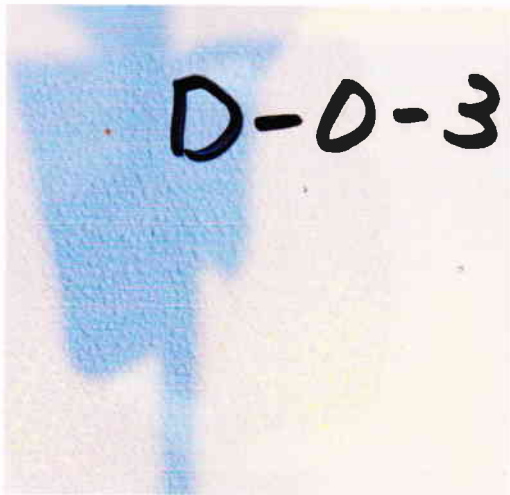
なお、D-15-600-1~3の試験体は、いずれも断熱塗装の目標膜厚を確保できなかったため、本試験以降の試験対象から除外した。

表-6 膜厚の測定結果と結露の発生状況(室内温度:20℃、湿度80%)

試験体番号	D5塗装までの膜厚測定値(μm) ①	D5塗装+断熱塗装の膜厚測定値(μm) ②	断熱塗装の膜厚測定値(μm) ②-①	結露の発生状況 (1時間後)
D-0-1	448	—	—	—
D-0-2	460	—	—	—
D-0-3	488	—	—	全面に結露発生
D-15-400-1	476	893	417	ほぼ結露の発生は見られない
D-15-400-2	456	843	387	—
D-15-400-3	476	914	438	—
D-15-500-1	464	927	463	—
D-15-500-2	420	907	487	—
D-15-500-3	464	1016	552	結露の発生は見られない
D-15-600-1	420	848	428	目標膜厚を確保できていないため、試験対象から除外
D-15-600-2	472	801	329	
D-15-600-3	464	805	341	
D-20-400-1	464	792	328	—
D-20-400-2	480	913	433	結露の発生は見られない
D-20-400-3	492	1029	537	—
D-20-500-1	456	1024	568	ほぼ結露の発生は見られない
D-20-500-2	488	925	437	—
D-20-500-3	492	1110	618	—
D-20-600-1	488	1134	646	—
D-20-600-2	476	1046	570	—
D-20-600-3	476	1109	633	ほぼ結露の発生は見られない

※黄色着色部は各試験ケースの代表試験体(断熱塗装の目標膜厚を確保している試験体)を示す。

試験開始から1時間後の各試験ケースにおける結露発生状況を確認した結果、断熱塗装を施していない従来のD5塗装面(試験体B-0-3)では全面に結露が生じたのに対し、断熱塗装を施した塗装面には結露がほとんど見られず、HCP混合量や膜厚による差もほとんど見られなかった。これにより、箱桁内部の上フランジ面に断熱塗装を施すことで結露を抑制できることを確認した。また、HCP15%混合(重量比)かつ膜厚400μmの断熱塗装で十分に結露を抑制できること確認した。なお、B-0-3試験体は目視で直接確認できるほど結露が発生していたが、断熱塗装を施した試験体は目視で直接見ても結露が発生しているか判別できなかったため、薄紙を敷いて濡れ具合いで結露の発生状況を確認した。



(a) D-0-3試験体(拡大)



(b) D-15-400-1試験体



(c) D-15-500-3試験体



(d) D-20-400-2試験体



(e) D-20-500-1試験体



(f) D-20-600-3試験体

写真-6 結露発生状況

### 3-3 付着力確認試験

断熱塗装後の塗膜付着力を確認する。

#### (1) 塗装仕様、試験ケース、試験体形状

結露抑制効果確認試験後の各試験ケース1体を用いる。

#### (2) 試験方法

JIS K 5600-5-7:1999(塗料一般試験方法 第5部 第7節)に準拠し、アドヒージョンテスターを用いた付着力確認試験を行う。各試験体の測定数は3箇所とし、測定値の平均が2.0MPa以上(『鋼構造物塗膜調査マニュアル(日本鋼構造協会)』に準拠)であることを確認する。

#### アドヒージョンテスターの使い方の例



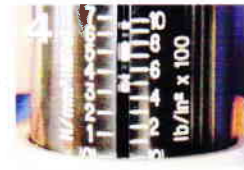
1 ドリー(試験円筒)は直径20mmが原則ですが別途協定で決めることも可能です(試験片は30mm角以上)。ドリーを塗膜に接着するとき、両接着面に軽くヘーパーをかけると接着性がよくなります。



2 カッターでドリー周辺の塗膜に素地に達する切込みを入れます。



3 ドリーをテスター下部に固定して、テスター上部のハンドルもしくはラチェットをなるべく一定速度で回して張力を加えていきます。



4 はく離もしくは凝集破壊(塗膜自体が引きちぎられた状態)や層間はく離が起きたら、その時の針の位置を目盛から読み取ります。

#### 【付着力の合否判定基準】

『鋼構造物塗膜調査マニュアル(日本鋼構造協会)』より

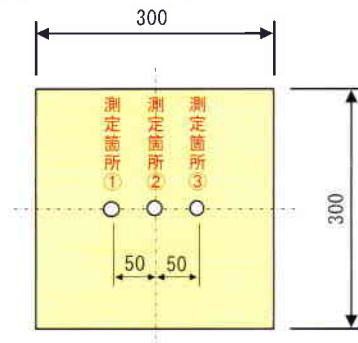
#### 引張付着力の評価基準の一例

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

※本試験では最高評価点を合否判定基準値とする

#### (3) 測定箇所

付着力の測定箇所を図-4に示す。



結露抑制効果確認試験後の各試験ケース1体を用いる

図-4 付着力の測定箇所



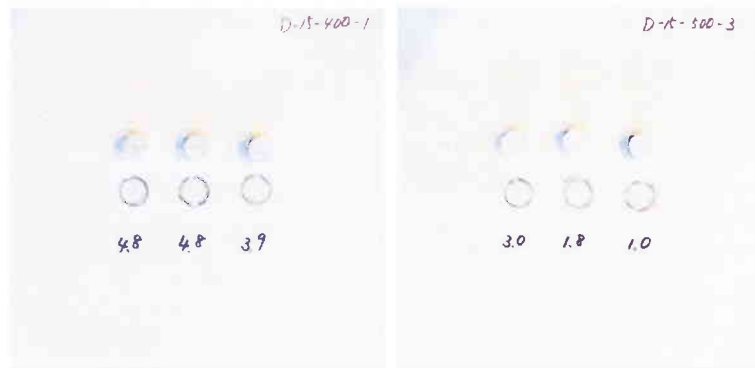
#### (4) 試験結果

各試験体における塗膜付着力の測定結果を表-7に示す。

表-7 付着力の測定結果

試験体番号	付着力 (MPa)				判定 ≥ 2.0 MPa
	測定箇所①	測定箇所②	測定箇所③	平均	
D-15-400-1	4.8	4.8	3.9	4.5	OK
D-15-500-3	3.0	1.8	1.0	1.9	OUT
D-20-400-2	3.2	1.8	4.0	3.0	OK
D-20-500-1	3.0	2.0	2.9	2.6	OK
D-20-600-3	2.6	2.8	3.0	2.8	OK

各試験体の塗膜付着力を確認した結果、D-15-500-3試験体以外は判定基準の2.0MPaを満足し、断熱塗装の塗膜付着力に問題ないことを確認した。なお、判定基準を満足しなかったD-15-500-3試験体(ただし、ほぼ基準値に近い値を示している)において、各試験体の測定結果の傾向から測定箇所③はイレギュラー値と判断した。



(a) D-15-400-1

(b) D-15-500-3



(c) D-20-400-2

(d) D-20-500-1

(e) D-20-600-3

写真-7 付着力確認後の試験体

### 3-4 断熱効果確認試験

箱桁内部全面への断熱塗装を想定した模擬試験体により、外部からの入熱に対する断熱効果を確認する。

#### (1) 塗装仕様

本試験の塗装仕様を表-8に示す。

表-8 塗装仕様

塗装区分	塗装工程	塗料名	塗装方法	目標膜厚 μm/回
D5塗装	2次素地調整	サンドペーパー等による目荒らし	—	—
	第1層	変性エポキシ樹脂塗料内面用	エアレス	120
	第2層	変性エポキシ樹脂塗料内面用	エアレス	120
断熱塗装	第3層	ヒートカットパウダーを混合した変性エポキシ樹脂塗料内面用	エアレス	500

#### (2) 試験ケース

本試験の試験ケースを表-9に示す。

表-9 試験ケース

試験体番号	HCP混合量 (重量比)	断熱塗料 の目標膜厚	試験体数
B-0	D5塗装のみ		1
B-20-500-1, 2	20%	500 μm	2

#### (3) 試験体および試験方法

内部に断熱塗装を施した箱桁を想定し、塗料空缶内面に塗装を施した試験体(写真-8)を用いる。外部からの熱に対する断熱効果の確認は、熱電対を用いて各試験ケースの外気温・缶外面・缶内面・缶内空中の温度計測(AM11:00~PM1:00)により行う。断熱効果の確認方法イメージを図-5に、計測状況を写真-9に示す。

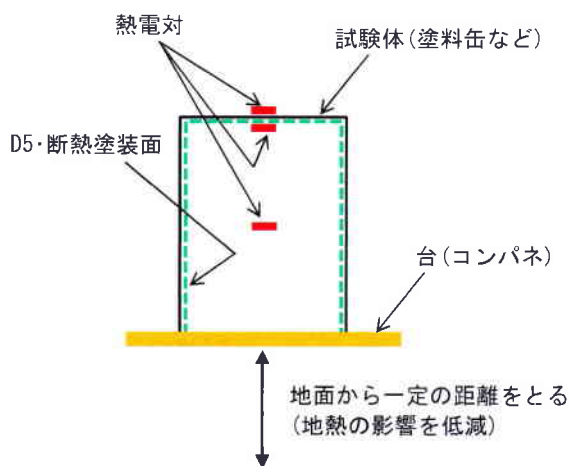


図-5 断熱効果の確認方法イメージ



写真-8 試験体



写真-9 計測状況

#### (4) 試験結果

着目点(缶外面、缶内面、缶内空中)ごとの温度計測結果を図-6に示す。

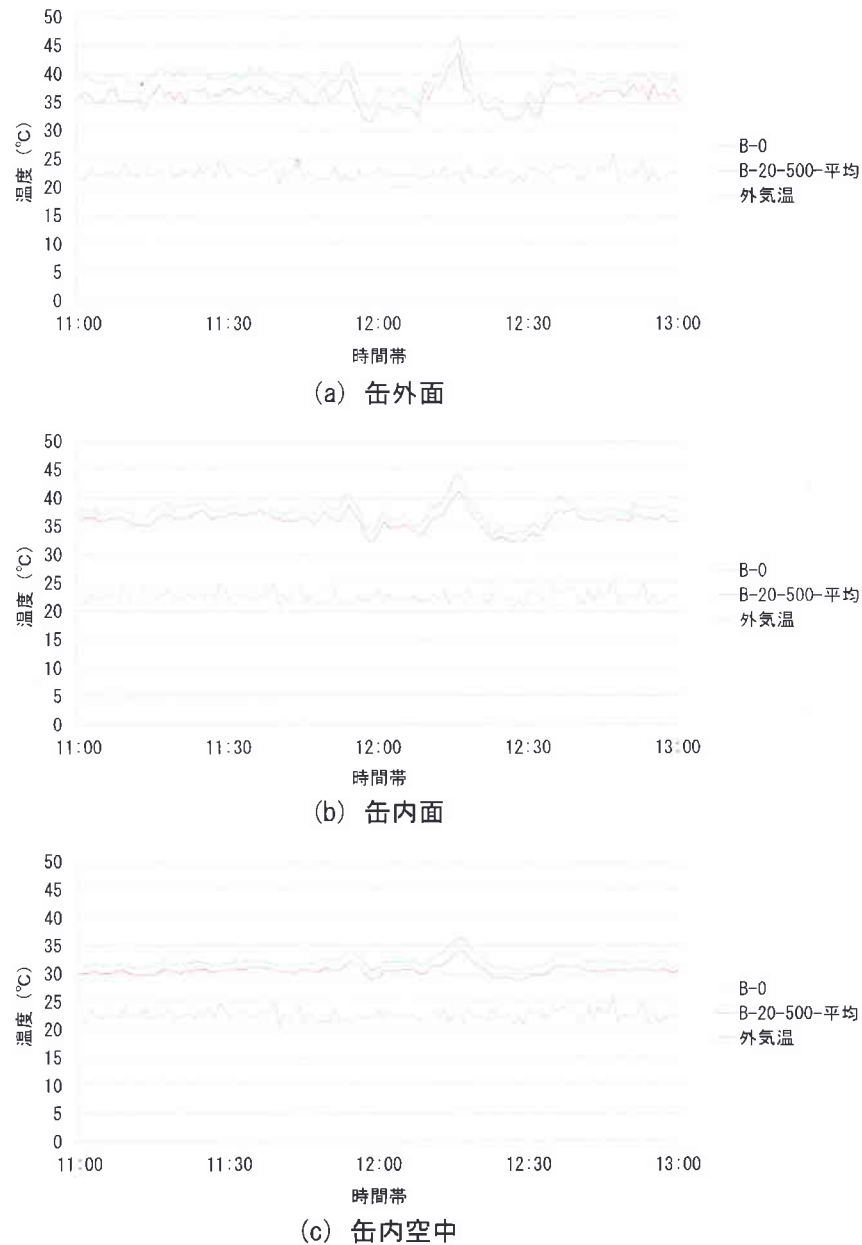


図-6 着目点ごとの温度計測結果

缶内面に断熱塗装を施したB-20-500試験体の温度計測結果は、いずれの着目点に対しても断熱塗装を施していないB-0試験体より全時間帯を通して約2~3°C低い値を示している。このことから、箱桁内部全面に断熱塗装を施すことで、外部からの入熱に伴う箱桁内部の温度上昇が低減するとともに、熱容量の大きい床版に接する上フランジ面と他の部位との温度上昇差も縮まることが想定できるため、上フランジ面のみに断熱塗装を適用した場合よりもさらに上フランジ面の結露を抑制できるものとする。

#### 4. まとめ

HCPを混合した変性エポキシ樹脂塗料による断熱塗装について、各種の試験を行い、下記の結果を得た。

- ①ウェット膜厚によるドライ膜厚の推定式を算出した。
- ②塗装作業性および外観に問題がないことを確認した。
- ③結露に対して断熱塗装の優位性を確認し、結露が生じやすい箱桁内部の上フランジ面に適用できることを確認した。
- ④塗膜の付着力に問題ないことを確認した。
- ⑤箱桁内部全面に断熱塗装を施すことで、さらに上フランジ面の結露を抑制できるもの  
と考える。