

## 6. 総括

### 6. 1 まとめ

道路橋において、火災によるダメージを受けた場合には、復旧に長時間を要する場合があるため、例えば迂回路のない場合などには火災の影響は極めて大きい。鋼材の力学的特性として、構造用鋼材では 600℃、高力ボルトについては 400℃を超える火災を受けた場合強度低下するため、道路橋の通行や補修補強の可否を迅速に判断するために、400～600℃に達しているかどうかを、非破壊で迅速にかつ簡便に判定できる方法の確立が望まれる。

これらのことから、本研究は、主桁等の強度低下が懸念される温度での火災を想定し、塗膜の外観変状、付着力及び残存膜厚など、非破壊による方法で迅速にかつ簡便に被災温度を判定できる方法について、検討した。

本研究で得られた主な知見は、次のとおりである。

(1) 鋼道路橋で想定される被災状況（架橋環境、炎の影響）を考慮して、統一した加熱条件で受熱温度と外観性状の関係について把握するための方法について検討を行い、鋼材温度上昇と対応できる再現性のある試験方法を見いだした。

#### ①開放型ガス炉加熱試験

酸素が常時供給される状態にあり、桁下空間が広い橋梁等を想定している。加熱した鋼板の下面は炎に近い開放部位の炎側条件を評価するために用い、上側については炎に近い開放部位の反対側の条件を評価することを想定。

ガスバーナーを熱源とし、供試体を水平に設置して片面から加熱する方法。

#### ②開放型ガス炉接炎試験

開放型ガス炉加熱試験と同様、酸素が常時供給される状態にあり、桁下空間が広い橋梁に直接炎が当たる場合を想定。

開放型ガス炉加熱試験と同様の装置を使用し、ガスバーナーから噴出する火炎が直接接するように、供試体の位置をガスバーナーに近づけた状態で実施する方法。

#### ③電気炉加熱試験

塗膜に酸素が十分には供給されない状況となるため、不完全燃焼が生じることが想定され、桁下空間が狭い橋梁や箱桁内部など閉鎖空間条件の評価を想定。

電気炉を使用し、供試体を水平に設置し両面から加熱する方法。

なお、①及び②での火災曲線は、想定する炎の影響に最も近いと考えられる ISO の火災曲線に準じて、温度上昇が緩やかになるように点火後 25～30 分程度で目標温度に到達し、30 分間保持する方法とした。

(2) 塗膜の外観変状から被災温度を推定するために、比較対象に用いられる写真撮影方法について色調補正方法を策定した。

(3) 加熱に伴う塗膜の変状としては、主に次に示す6段階の変状で一般化した。

- ①上塗りの変色（「ふくれ」を伴う場合もある。）
- ②上塗りの「われ」や「はげれ」（灰化・炭化している場合を含む。）
- ③中間層（中塗り、下塗り(3)）の変色
- ④最下層（下塗り(1)(2)）が露出している。
- ⑤最下層（下塗り(1)(2)）の変色
- ⑥素地の露出

(4) 鋼板供試体及び実橋供試体に対する開放型ガス炉加熱試験、開放型ガス炉接炎試験、電気炉加熱試験それぞれの結果を図 6.1.1 から図 6.1.4 に、上記（3）で一般化した塗膜の6段階の変状のうち、上塗りの剥がれと下塗りの変色が生じる温度に着目して塗膜の損傷状態を整理したものを図 6.1.5 に再掲する。

その結果、全ての供試体において、200～400℃で上塗りの炭化・剥がれ（変状 2）が生じ、500～700℃に至るまでには下塗りに変色等（変状 5）が生じることがわかった。更にデータを増やすことで、塗装外観から受熱温度が推定できる可能性があると考えられる。

(5) 実橋供試体の実験結果からは、塗膜と鋼板の付着が強固でない場合、上記変状段階が早まる可能性があることが分かった（図 6.1.6）。つまり、受熱温度の推定の際には、既存の塗膜状態について塗膜の付着の観点で把握しておく必要があることが分かった。

## 6. 2 今後の課題

(1) 塗装の劣化による違い

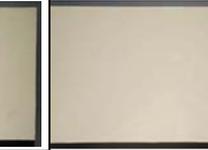
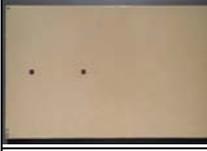
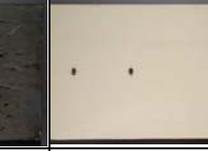
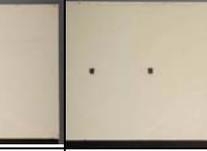
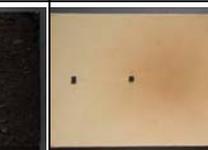
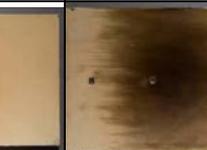
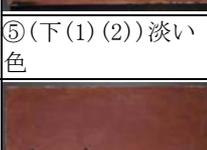
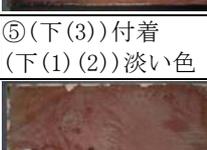
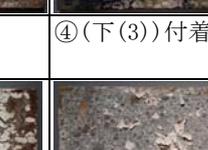
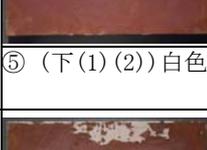
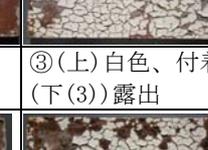
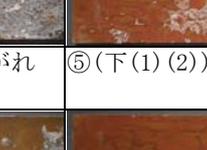
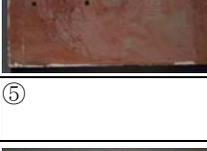
作成した供試体については、塗装して1ヶ月のものであったため、一定期間暴露した塗装鋼板による試験などにより引き続き検討する必要がある。

(2) 既設橋の供試体数を増やす

実際の塗膜の状態と比較するため、撤去橋から様々な塗装鋼板を切り出し、引き続き検討する必要がある。

(3) 加熱試験後の供試体を暴露し、火災を受けた塗膜の耐久性についても検証していく。

表 3.2.8 鋼板供試体塗膜の変状（開放型ガス炉加熱試験・加熱面）

	A-1	A-2	B-1	C-1	C-5
加熱前					
200℃					
	①	①	②われ		
300℃					
	②ふくれ. はがれ	⑤(下(3))剥離、付着 (下(1)(2))黒色	②われが進行	①濃い色に変色	①
400℃					
	⑤(下(1)(2))淡い色	⑤(下(3))付着 (下(1)(2))淡い色	②付着	④(下(3))付着	②(中)付着 (下(2))淡い色
500℃					
	⑤(下(1)(2))白色	⑤	③(上)白色、付着 (下(3))露出	④(上)灰色はがれ (下(3))付着	⑤(下(1)(2))緑色
600℃					
	⑤	⑤	③	⑤(下(2))淡い色 (下(3))剥離	⑤
700℃					
	⑤(下(1)(2))緑色	⑤(下(1)(2))緑色	⑤(下(1)(2))緑色	⑤(下(1)(2))緑色	⑤

ここで、(上)上塗り、(中)中塗り、(下(i)) 下塗り i 層目

表 3.2.8 鋼板供試体塗膜の変状（開放型ガス炉加熱試験・非加熱面）

	A-1	A-2	B-1	C-1	C-5
加熱前					
200°C					
	①	①	④(上)われはがれ		
300°C					
	②ふくれ. はがれ	②(上)われ ④(下(3))剥離付着 (下(1)(2))黒色	②(上)われが進行 ④	①濃い色に変色	①
400°C					
	⑤(下)赤褐色 →淡い色	②(上)炭化 ④(下(3))付着	③(上)灰色 ④	②(上)ふくれ	⑤(下(2))赤み
500°C					
	⑤(下)緑色	⑤(下(3))付着銀色 (下(1)(2))赤緑色	④(上)白色付着、 (下(3))露出	③(上)灰色はがれ ④(下(3))付着灰色	⑤(下(1)(2)) 緑色
600°C					
	⑤	⑤	④(下(3))付着	⑤(下(2))淡い色	⑤
700°C					
	⑤	④(上)付着 ⑤(下(1)(2))緑色	⑤(下(1)(2))緑色	⑤	⑤

ここで、(上)上塗り、(中)中塗り、(下(i)) 下塗り i 層目

表 3.5.4 鋼板供試体塗膜の変状（電気炉加熱試験・上面）

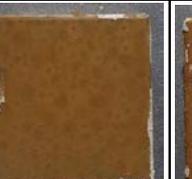
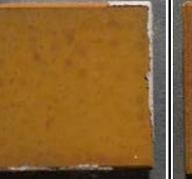
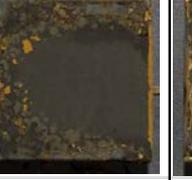
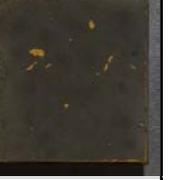
	A-1	A-2	B-1	C-1	C-5
加熱前					
200℃					
	①	①	①		
300℃					
	⑤黒色	⑤黒色	②われ、ふくれ	①	①
400℃					
	⑤	⑤	②	②われふくれ	②はがれ
500℃					
	⑤茶色	⑤薄い茶色	⑤濃い茶色	⑤はがれ	⑤赤、緑茶
600℃					
	⑤	⑤	⑤緑色	⑤	⑤ふくれ
700℃					
	⑥	⑥	⑥	⑤濃灰色	⑤濃灰色

表 3.5.4 鋼板供試体塗膜の変状（電気炉加熱試験・下面）

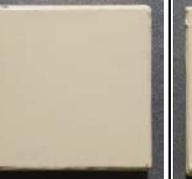
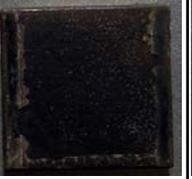
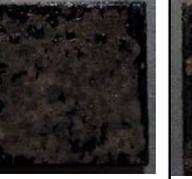
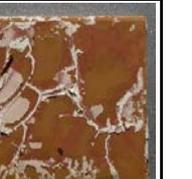
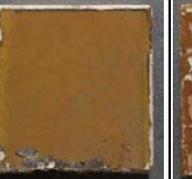
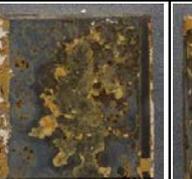
	A-1	A-2	B-1	C-1	C-5
加熱前					
200℃	 ①	 ①			
300℃	 ⑤黒色	 ⑤黒色	 ②われふくれ	 ①	 ①
400℃	 ⑤	 ⑤	 ②	 ②	 ④
500℃	 ⑤淡い茶色	 ⑤淡い茶色	 ⑤濃い茶色	 ⑤付着	 ⑥緑がかった茶
600℃	 ⑤	 ⑤	 ⑤緑色	 ⑤薄茶色	 ⑤
700℃	 ⑤	 ⑥	 ⑥	 ⑥	 ⑥

表 4.1.7 既設橋供試体塗膜の変状 (開放型ガス炉加熱試験・加熱面)

温度(°C)	1	2	4	5I	5B	6	7
加熱前							
400							
	⑤黒く変色	⑤赤みを帯びた色に変色	⑤鉛丹さび止め塗料淡い茶色	⑤鉛丹さび止め塗料淡い茶色	⑤鉛丹さび止めが淡い茶	⑤赤みを帯びた茶色	⑤赤みを帯びた茶色
700							
	⑤淡い茶色	⑤淡い茶色	⑤鉛丹さび止め塗料濃い茶色	⑥鋼材表面に焼き付いて黒く変色	⑥鋼材表面に焼き付いて黒く変色	⑤淡い茶色	⑤白みを帯びた淡い茶色

表 4.1.7 既設橋供試体塗膜の変状（開放型ガス炉加熱試験・非加熱面）

温度(°C)	1	2	4	5I	5B	6	7
加熱前							
400							
	④	⑤赤みを帯びた色に変色	⑤鉛丹さび止め塗料が淡い茶色	⑤鉛丹さび止め塗料が淡い茶色	④	②	⑤赤みを帯びた茶色
700							
	⑤淡い茶色	⑤淡い茶色	⑥鋼材表面に焼き付いて黒く変色	⑥鋼材表面に焼き付いて黒く変色	⑤白みを帯びた茶色	⑤淡い茶色	⑤白みを帯びた淡い茶色

表 4.2.6 既設橋供試体塗膜の変状 (電気炉加熱試験・上面)

温度(°C)	1	2	3	4	5I	5B	6	7
加熱前								
200								
	①		①	②	②	①	①	①
300								
	②	②	①	⑤濃茶色	⑤黒	⑤黒	⑤黒	⑤
400								
	③		②	⑤黒	⑤	⑤	⑤	⑤茶色
500								
		⑤淡茶色	②	⑤薄茶色	⑤	⑤淡い茶色	⑤淡い茶色	⑤
600								
	⑤薄い茶色	⑤薄茶色	②	⑤	⑤淡茶色	⑤濃茶色	⑤	⑤赤みがかった茶色
700								
	⑥割れ	⑤緑	⑥	⑥	⑥	⑥	⑤	⑤淡い茶色

表 4.2.6 既設橋供試体塗膜の変状 (電気炉加熱試験・下面)

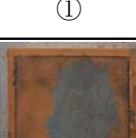
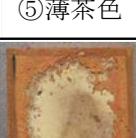
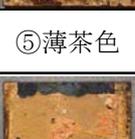
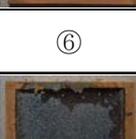
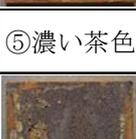
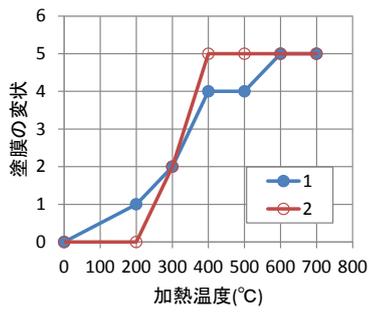
温度(°C)	1	2	3	4	5I	5B	6	7
加熱前								
200								
	①			②	②		①	①
300								
	②	②		⑤濃茶色	⑤黒	③	⑤黒	④
400								
	④	⑤薄茶色	①茶色	⑤黒	⑤	③	⑤	⑤茶色
500								
	④	⑤淡茶色	①	⑤薄茶色	⑤淡茶色	⑤淡茶色	⑤淡茶色	⑤赤みがかった茶色
600								
	⑤薄茶色	⑤	⑥	⑤	⑤濃い茶色	⑤	⑤	⑤
700								
	⑤淡茶色	⑤緑	⑥	⑥	⑥	⑤	⑤	⑤

表 6.1.1 塗膜の変状と加熱温度の関係まとめ (加熱面・上面)

	供試体 (加熱側・上面)		実橋供試体	
	開放型ガス炉加熱試験	電気炉加熱試験	開放型ガス炉加熱試験	電気炉加熱試験
A系	<p>Graph showing the change in coating state (塗膜の変状) versus heating temperature (加熱温度) for series A in an open gas furnace. Two data series, A1 (solid circles) and A2 (open circles), show a sharp increase in coating state between 100°C and 300°C, reaching a plateau of approximately 5.0 at 400°C and above.</p>	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series A in an electric furnace. Two data series, A1 (solid circles) and A2 (open circles), show a sharp increase in coating state between 100°C and 300°C, reaching a plateau of approximately 5.0 at 400°C and above.</p>	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series A in an open gas furnace for real bridge specimens. Multiple data series (2, 4, 5I, 5B, 6, 7) show a sharp increase in coating state between 100°C and 300°C, reaching a plateau of approximately 5.0 at 400°C and above.</p>	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series A in an electric furnace for real bridge specimens. Multiple data series (1, 2, 3, 4, 5I, 5B, 6, 7) show a sharp increase in coating state between 100°C and 300°C, reaching a plateau of approximately 5.0 at 400°C and above.</p>
B系	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series B in an open gas furnace. Data series B1 (dotted line with triangles) shows a gradual increase in coating state, reaching approximately 5.0 at 700°C.</p>	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series B in an electric furnace. Data series B1 (dotted line with triangles) shows a gradual increase in coating state, reaching approximately 5.0 at 700°C.</p>	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series B in an open gas furnace for real bridge specimens. Data series 1 (dashed line with triangles) shows a gradual increase in coating state, reaching approximately 5.0 at 700°C.</p>	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series B in an electric furnace for real bridge specimens. Data series 1 (dashed line with triangles) shows a gradual increase in coating state, reaching approximately 5.0 at 700°C.</p>
C系	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series C in an open gas furnace. Two data series, C1 (solid squares) and C5 (open squares), show a sharp increase in coating state between 100°C and 300°C, reaching a plateau of approximately 5.0 at 400°C and above.</p>	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series C in an electric furnace. Two data series, C1 (solid squares) and C5 (open squares), show a sharp increase in coating state between 100°C and 300°C, reaching a plateau of approximately 5.0 at 400°C and above.</p>		

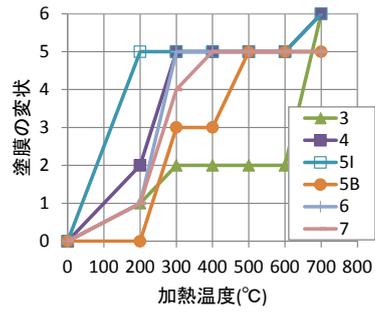
表 6.1.2 塗膜の変状と加熱温度の関係まとめ (非加熱面・下面)

	供試体 (熱源裏側・下面)		実橋供試体	
	開放型ガス炉加熱試験	電気炉加熱試験	開放型ガス炉加熱試験	電気炉加熱試験
A系	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series A on the non-heating side in an open gas furnace. Two data series, A1 (solid circles) and A2 (open circles), show a sharp increase in coating state between 100°C and 300°C, reaching a plateau of approximately 5.0 at 400°C and above.</p>	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series A on the non-heating side in an electric furnace. Two data series, A1 (solid circles) and A2 (open circles), show a sharp increase in coating state between 100°C and 300°C, reaching a plateau of approximately 5.0 at 400°C and above.</p>	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series A on the non-heating side in an open gas furnace for real bridge specimens. Multiple data series (2, 4, 5I, 5B, 6, 7) show a sharp increase in coating state between 100°C and 300°C, reaching a plateau of approximately 5.0 at 400°C and above.</p>	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series A on the non-heating side in an electric furnace for real bridge specimens. Multiple data series (1, 2, 3, 4, 5I, 5B, 6, 7) show a sharp increase in coating state between 100°C and 300°C, reaching a plateau of approximately 5.0 at 400°C and above.</p>
B系	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series B on the non-heating side in an open gas furnace. Data series B1 (dotted line with triangles) shows a gradual increase in coating state, reaching approximately 5.0 at 700°C.</p>	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series B on the non-heating side in an electric furnace. Data series B1 (dotted line with triangles) shows a gradual increase in coating state, reaching approximately 5.0 at 700°C.</p>	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series B on the non-heating side in an open gas furnace for real bridge specimens. Data series 1 (dashed line with triangles) shows a gradual increase in coating state, reaching approximately 5.0 at 700°C.</p>	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series B on the non-heating side in an electric furnace for real bridge specimens. Data series 1 (dashed line with triangles) shows a gradual increase in coating state, reaching approximately 5.0 at 700°C.</p>
C系	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series C on the non-heating side in an open gas furnace. Two data series, C1 (solid squares) and C5 (open squares), show a sharp increase in coating state between 100°C and 300°C, reaching a plateau of approximately 5.0 at 400°C and above.</p>	<p>Graph showing the change in coating state versus heating temperature for series C on the non-heating side in an electric furnace. Two data series, C1 (solid squares) and C5 (open squares), show a sharp increase in coating state between 100°C and 300°C, reaching a plateau of approximately 5.0 at 400°C and above.</p>		



(a)付着性良好 (加熱前評価点 0)  
(c)付着性評価一覧 (加熱前)

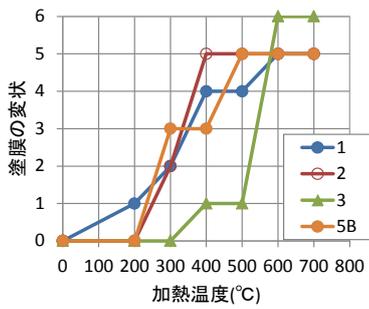
	1	2	3	4	5I	5B	6	7
評価点	0	0	3	2	3	3	1	3
付着性	◎	◎	×	△	×	×	○	×



(b)付着性不良 (加熱前評価点 1~3)  
(d)付着性評価一覧 (加熱後)

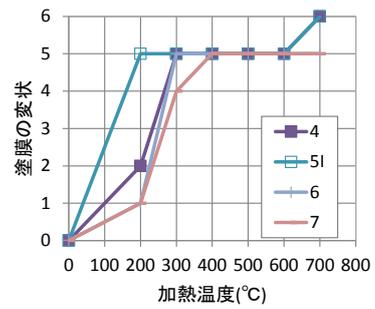
	1	2	3	4	5I	5B	6	7
評価点	0	1	3	3	3	3	3	3
付着性	◎	◎	×	×	×	×	×	×

図 6.1.1(a) 付着と塗膜の変状の関係 (上面・電気炉加熱試験)



(a)付着性良好 (加熱前評価点 0)  
(c)付着性評価一覧 (加熱前)

	1	2	3	4	5I	5B	6	7
評価点	0	0	0	2	3	0	2	3
付着性	◎	◎	(◎)	△	×	(◎)	△	×



(b)付着性不良 (加熱前評価点 1~3)  
(d)付着性評価一覧 (加熱後)

	1	2	3	4	5I	5B	6	7
評価点	0	0	0	3	3	1	3	3
付着性	◎	◎	(◎)	×	×	○	×	×

図 6.1.1(b) 付着と塗膜の変状の関係 (下面・電気炉加熱試験)

## おわりに

既設道路橋の火災被害に対する健全度評価手法の確立のために、塗装鋼材における受熱温度と外観性状の関係について実験的検討を行い、塗装条件によっては外観性状からある程度の鋼材特性への影響程度の推定が行いうることを明らかにした。一方、多様な既設橋の塗装仕様について外観性状による被災度判定を行うためには、現地の被災状況と対比することのできる、実際に熱影響を与えた照合用見本を予め作成しておくとともに、両者を正確に対比するための手法が必要であることから、対比用外観見本の作成方法（加熱試験方法）とデジタル画像データによる対比方法の提案を行った。

なお本研究では、実際に長期に供用された既設橋から採取した塗装鋼板についてもいくつかの加熱試験を行ったものの、全国の道路橋において今後発生しうる火災時に、速やかに被災度判定を行うためには、引き続き異なる様々な条件で見本の画像データを取得していく必要がある。そのため、本資料において対比用外観見本の作成方法及びデジタル画像データによる照合方法を、本研究で撮影した様々な加熱条件下での見本用画像データとともに公開することとした。なお画像データについては、本資料とは別に RAW 形式の電子データで国総研及び道路構造物管理研究室のホームページにて公開する予定である。

今後、極めて多岐にわたる既設道路橋の塗装仕様について、本資料を参考に他機関等においても本研究で提案した同じ手法による対比用外観見本及びその画像データが作成・公開されることで、全国の道路橋における火災被害時の対応の合理化に資することが期待される。

本資料のとりまとめにあたっては、被災塗膜の損傷見本作成のための加熱方法の検討にあたり、大阪工業大学八幡工業実験場の栗田章光教授に貴重なご助言をいただいた。また、塗装の工事実績調査及び撤去橋梁部材の提供について各機関に多大なるご協力をいただいている。ここに謝意を表す。