

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420482

研究課題名(和文)維持管理を軽減するための結露の抑制と簡易評価に関する研究

研究課題名(英文)Study on prevention of dew condensation by using heat insulation coating

研究代表者

永田 和寿(Nagata, Kazutoshi)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40301238

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文):本研究の目的は、断熱塗料を利用することで特に冬の早朝に鋼桁のウェブや下フランジで生じる結露を抑制することにより、桁の腐食環境の改善を行うための技術開発を行うことである。そこで、断熱塗料を用いた鋼桁を模擬した模型(鋼板)の結露に関する数値解析ならびに小型環境試験器を用いた実験を行った。さらに、実際の橋梁への適用を検討するために、実際の橋梁において結露に関する調査と検討を行った。その結果、断熱塗料を使用することで桁の温度低下が抑えられ、温度低下によって生じる結露を抑制することができることが明らかになった。これらの研究成果により、鋼桁に生ずる結露を抑制するための基本技術を開発することができた。

研究成果の概要(英文): Many steel structures are faced to the problem of deterioration in Japan. Deterioration of the coating due to dew condensation causes corrosion of steel bridges. Therefore, it is necessary to develop a technique for preventing dew condensation. In addition, dew condensation is deeply related to the girder. In this study studies on prevention of dew condensation by paying attention to the temperature of girder were carried out. Heat insulating coating and heat storage material were used to prevent dew condensation. As a result, it was found that technique to prevent dew condensation is effective.

研究分野：構造工学

キーワード：結露 桁温度 断熱塗料

様式 C - 19、F - 19、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

橋梁において、水分が付着する原因は降雨や結露によるものであり、水分の付着は塗膜の劣化につながり、防食機能が低下した部材では腐食が生じ老朽化の一因となっている。結露は鋼部材が露点温度以下となった場合に発生し、鋼部材が冷える程、結露が発生しやすい環境となる。

2. 研究の目的

断熱塗料を利用することで鋼桁の温度低下を防ぐことで鋼桁のウェブや下フランジで生じる結露を抑制することにより、鋼桁の腐食環境の改善を行うための技術開発を行うことを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

(1) 塗料、膜厚、板厚の差異が与える鋼板の結露発生への影響を確認するため、以下の実験を行った。実験は写真1に示すような小型環境試験機に試験体を設置し結露環境を再現した(表1)。この際、気温、湿度、表面温度、結露を定量的に計測した。



写真1 小型環境試験機

表1 温湿度制御

経過時間 (min)	気温 (°C)	湿度 (%)
0	13.0	73
8	11.5	75
16	11.0	77
24	10.0	79
36	13.0	76
44	14.0	77
50	17.5	85
56	15.5	80

塗料の差異

裸鋼板、断熱塗料、フッ素樹脂塗料による表面温度、結露の発生現象への影響・効果を確認した。断熱塗料及びフッ素樹脂塗料の膜厚は断熱塗料に関する種々の資料を参考に1.0mmとした。

膜厚の差異

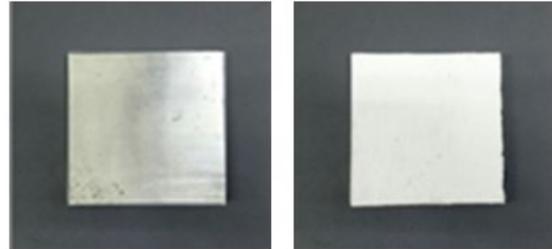
断熱塗料の膜厚の差異による表面温度、結

露の発生現象への影響・効果を確認した。膜厚は1.0mm, 1.5mmの2種類用意した。

板厚の差異

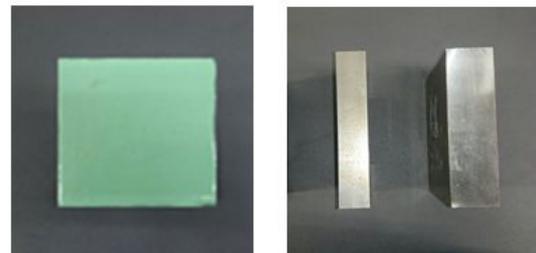
裸鋼板の板厚の差異による表面温度、結露の発生蒸発現象への影響・効果を確認した。板厚は10mm, 20mm, 30mmの3種類用意した。

各試験体を写真2に示す。



(a)裸鋼板

(b)断熱塗料



(c)フッ素樹脂塗料

(d)板厚20mm, 30mm

写真2 実験試験体

(2) 実験の結果を補完することを目的に、汎用熱流体解析ソフト STAR-CD を用いて小型環境試験機、裸鋼板、塗装を施した鋼板の簡易モデルを作成し、固気熱連成シミュレーションを行った。図1に小型環境試験機を模擬した解析モデルを示す。本解析では、各試験体の表面温度の影響・効果の確認に加え、実験では得られなかった塗装内部の鋼板温度についても確認した。

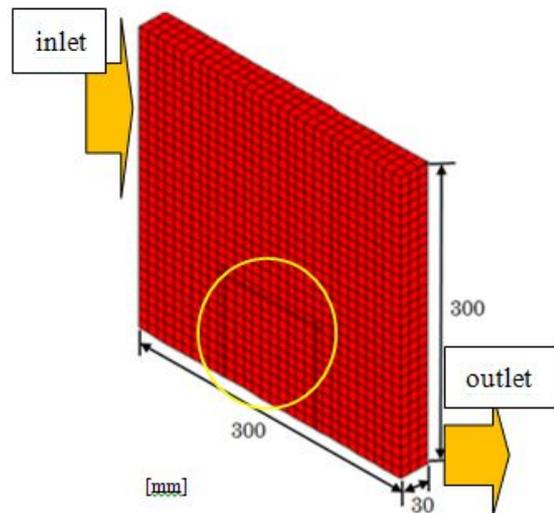


図1 小型環境試験機を模擬した解析モデル

以下の試験体の解析モデルを作成し、比較・検討を行った

塗料の差異

裸鋼板、断熱塗料、フッ素樹脂塗料の塗料の違いによる表面温度への影響・効果を確認した。断熱塗料及びフッ素樹脂塗料の膜厚は1.0mmとした。

膜厚の差異

断熱塗料の膜厚の違いによる表面温度への影響・効果を確認した。断熱塗料の膜厚1.0mmと1.5mmの2種類を比較した。

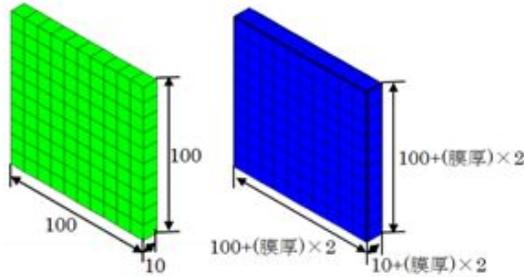


図2 試験体を模擬した解析モデル

4. 研究成果

(1) 実験結果

表1に示す気温変化は、冬季の夜間から朝方にかけて気温が徐々に低下していき、朝方から日の出と共に気温が高くなっていく状況を表している。そして、小型環境試験機内の気温・湿度は、この表に示す制御を行った。

塗料の差異

図3に気温（橙色）、湿度（水色）、裸鋼板の表面温度（紫色）、断熱塗料を塗布した鋼板の表面温度（黄色）、フッ素樹脂塗料を塗布した鋼板の表面温度（緑色）を示す。断熱塗料を塗布した鋼板の表面温度は他と比べて気温変化に対して早く追従し、気温上昇時の温度差を小さくすることができている。

図4は先ほどの各試験体の表面温度から気温を引いた温度差を表すグラフである。このグラフの負は表面温度が気温を下回っていることを意味し、大きく下回る程、結露が生じやすい。いずれの試験体においても50分あたりで大きく気温を下回るが、断熱塗料を塗布した鋼板では裸鋼板やフッ素樹脂塗料を塗布した鋼板と比べると、0.2～0.6表面温度を高く保っている。

図5は結露センサの計測結果である、いずれも表面温度が気温を最も下回った50分付近においてセンサが大きく反応しており、温度差とセンサの反応は関連性があることが分かる。そして、結露状態と判定されるのは1V以上であり2V程度出力している裸鋼板、フッ素樹脂塗料を塗布した鋼板では結露状態にあるといえる。一方で、断熱塗料の場合は1V未満で、結露センサの反応を抑えることができていることがわかる。しかし、断熱塗料でも1V近く出力しており、結露センサでは結露状態ではないと判定されるが、結露状態に近く、試験体周りの湿度は図3に示す

相対湿度よりも高くなっていることが示唆される。

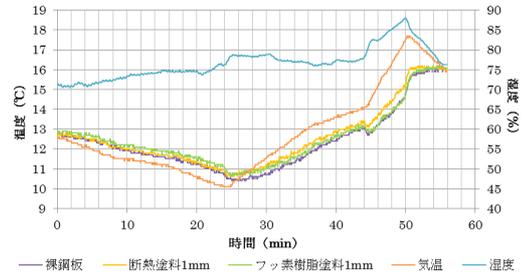


図3 槽内の温湿度、各試験体の表面温度（塗料の差異）

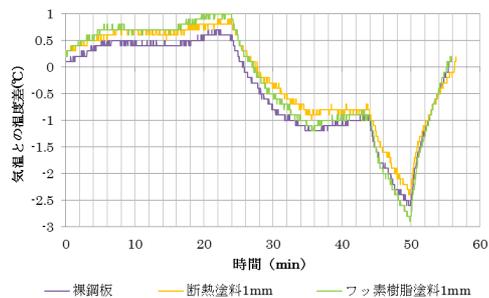


図4 各試験体と気温の温度差（塗料の差異）

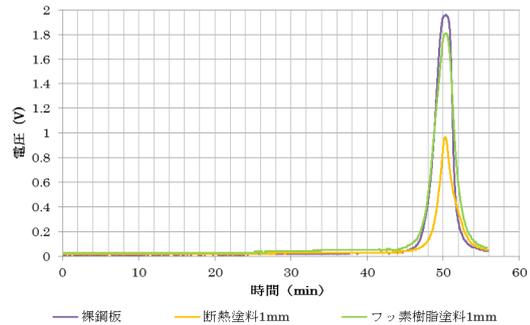


図5 結露センサの出力（塗料の差異）

膜厚の差異

図6に気温（橙色）、湿度（水色）、断熱塗料を膜厚1.0mmで塗布した鋼板の表面温度（黄色）、膜厚1.5mmで塗布した鋼板の表面温度（赤色）を示す。膜厚が厚くなると断熱効果が増すため、気温との温度差をより小さくすることができていることがわかる。

図7は先ほどの各試験体の表面温度から気温を引いた温度差を表すグラフである。断熱塗料の膜厚1.5mmでは膜厚1.0mmと比べて、全体的に温度差を小さくすることができ、最大で0.4ほど表面温度を高く保つことができている。

図8に結露センサの計測結果を示す。膜厚1.5mmの場合は結露センサの反応を0.2V程度に抑えることができ確実に結露を抑制できている。このことから、適切な膜厚を確保することで結露の抑制が可能であるといえる。

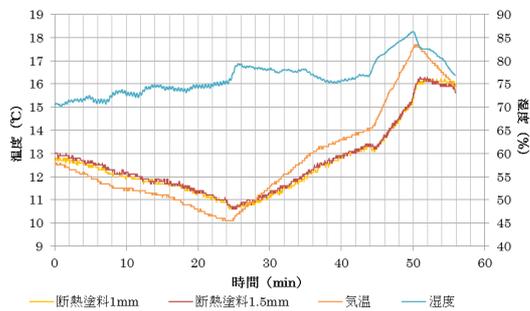


図6 槽内の温湿度, 各試験体の表面温度 (膜厚の差異)

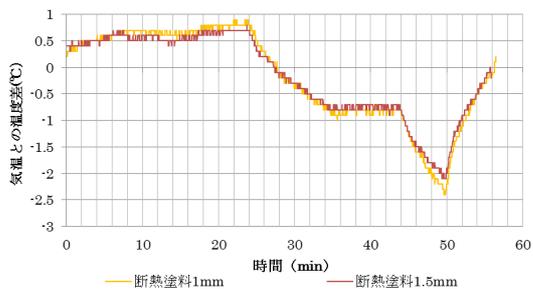


図7 各試験体と気温の温度差 (膜厚の差異)

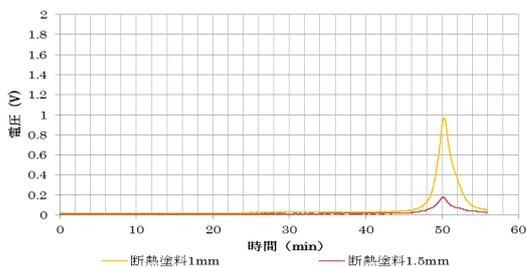


図8 結露センサの出力 (膜厚の差異)

板厚の差異

図9に気温(橙色), 湿度(水色), 板厚 10mm の鋼板の表面温度 (紫色), 板厚 20mm の鋼板の表面温度 (青色), 板厚 30mm の鋼板の表面温度 (黒色) を示す . 板厚が増加するにつれて , 温度変化が緩慢となり , 温度差が時間経過とともに生じやすくなることわかる .

図 10 は先ほどの各試験体の表面温度から気温を引いた温度差を表すグラフである . 温度差の最大最小はさほど変わらないが , 温度差が解消されるまでの時間が異なり , 板厚が増加するにつれて長くなる .

図 11 に結露センサの計測結果を示す . いずれも最大 2V 出力しているが , センサの反応時間が異なる . 板厚が増加するにつれて温度差が解消されるまでの時間が長くなり , これに伴って濡れ時間が長くなっていることがわかる .

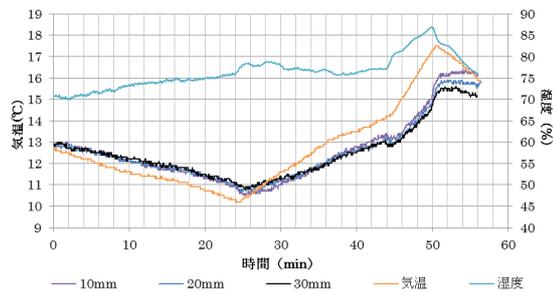


図9 槽内の温湿度, 各試験体の表面温度 (板厚の差異)

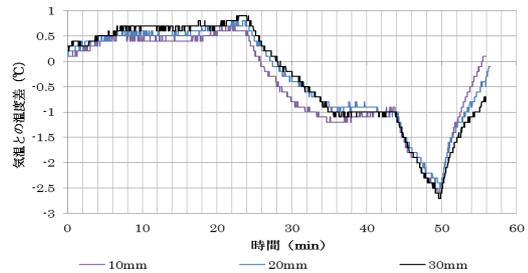


図10 各試験体と気温の温度差 (板厚の差異)

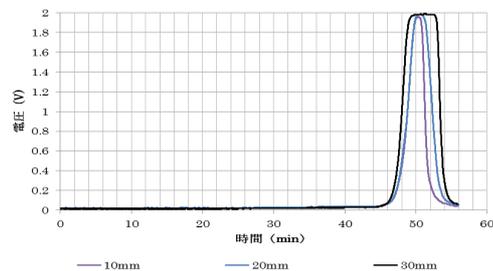


図11 結露センサの出力 (板厚の差異)

(2) 解析結果

塗料の差異

図 12 に , 実験で結露が発生した 50 分時の裸鋼板 , フッ素樹脂塗料と断熱塗料の表面温度分布を示す . 断熱塗料の表面温度は , 裸鋼板のそれよりも 0~0.5 高い温度 . フッ素樹脂のそれよりも 0.5 ~1.0 高い温度となっている . この傾向は実験とほぼ一致するため , 実験で得られた現象が妥当であることが示唆される .

図 13 に , フッ素樹脂塗料及び断熱塗料の塗装内部の鋼板の表面温度分布を示す . フッ素樹脂塗料では , 塗膜と鋼板で表面温度の差が殆ど無い (図 - 12(b) , 図 - 13(a)) . 一方で , 断熱塗料では塗膜と鋼板で表面温度に差があり (図 - 12(c) , 図 - 13(b)) , 断熱効果があることがわかる . このことから , 断熱塗料では , たとえ内部の鋼板が冷えてしまっても , この冷えた熱を塗膜表面に伝えにくくすることから , 塗膜表面と外気の温度差が小さくなり , 結露を生じにくくできるということがわかる . また , フッ素樹脂塗料には断熱効果

がなく、断熱塗料のような効果は期待できない。

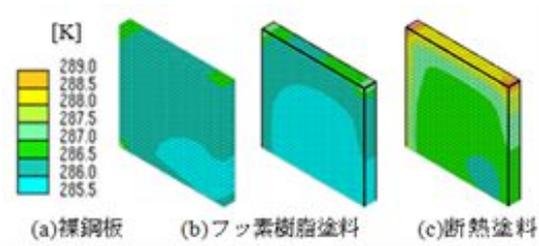


図 12 各試験体の表面温度分布 (塗料の差異)

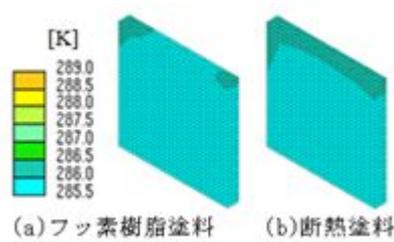


図 13 塗装内部の鋼板の表面温度分布 (塗料の差異)

膜厚の差異

図 14 に、実験で結露が発生した 50 分時の断熱塗料膜厚 1.0mm と 1.5mm の表面温度分布を示す。膜厚 1.5mm の場合では、1.0mm と比べて 0~0.5 K 表面温度を高くすることができる。このことは、断熱塗料の断熱効果が増したことによって、内部の鋼板から冷えた熱が伝わりにくくなるため、温度差を小さくできていると考える。

図 15 に、膜厚 1.0mm と 1.5mm の断熱塗料内部の鋼板の表面温度分布を示す。膜厚 1.5mm の方が内部の鋼板温度を高くすることができる。このことから、断熱塗料では気温低下時において、外気からの熱流入を抑え、内部の鋼板を冷えにくくする効果があることが分かる。そして、またその熱を塗膜表面に伝えにくくすることから、膜厚を厚くするほど、より温度差を小さくでき、結露を生じにくくすることができるという。

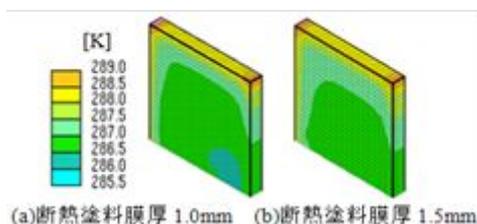


図 14 各試験体の表面温度分布 (膜厚の差異)

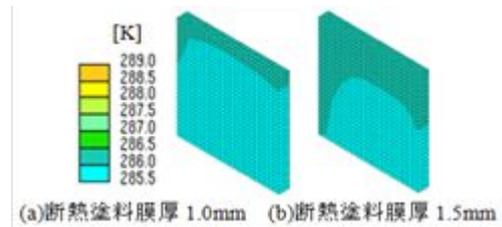


図 15 塗装内部の鋼板の表面温度分布 (膜厚の差異)

(3) 結論および今後の課題

本研究では、結露の抑制技術の開発をめざし、断熱塗料を用いた鋼板における小型環境試験機を用いた実験を行い、断熱塗料が鋼板に与える効果を確認し、結露の抑制が可能であるかについて基礎的な検討することを研究目的とした。以下に得られた結論について述べる。

断熱塗料は熱伝導率が低いため、気温低下時には外気から鋼板への熱移動を抑え内部の鋼板温度を下がりやすくすることに加え、気温上昇時にはたとえ内部の鋼板が冷えてしまったとしても内部の鋼板から塗料の表面への熱移動を抑えることから、表面温度と外気の温度差を小さくすることができる。実験と解析から、膜厚 1.0mm の場合では表面温度が裸鋼板のそれよりも 0~0.5 K、1.5mm の場合では 0.5~1.0 K 高い結果を得た。

断熱塗料の膜厚が大きい程、外気と表面温度の温度差を小さくできた。そして、それに伴って結露を抑制することができた。このことから、適切な膜厚を確保することで結露の抑制が可能であるといえる。

フッ素樹脂塗料には断熱塗料に比べて熱伝導率が大きい程、断熱効果がほとんどないことが分かった。

冬季のように寒い日の朝方に生じる結露について気温に比べ、鋼板の温度上昇が時間的に遅れることが原因であることを明らかにした。断熱塗料を用いて鋼板の熱を表面に伝えにくくし、この際生じる温度差を小さくすることで結露の抑制が可能である。

板厚が増加するにつれて温度変化が緩慢となり温度差が生じやすくなる。このことから、結露の生じる環境下では、板厚の大きい部材がより結露が生じやすいということが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

永田和寿, 堀田広己, 原聡太郎, 山口隆司, 北原武嗣: 断熱塗料を用いた結露抑制に関する研究, 断熱塗料を用いた結露抑制に関する研究 構造工学論文集, 第 62A 巻 pp.595-602,

2016

永田和寿, 八木千里, 内藤涼介, 北原武嗣:
気象データを用いた鋼桁の結露評価に関する基礎的研究, 構造工学論文集, 第 62A 巻, pp.796-803, 2016

永田和寿, 堀田広己, 原聡太郎, 北原武嗣,
山口隆司: 断熱塗料を用いた結露抑制に関する研究, JCOSSAR2015 論文集[A 論文], 第 8 巻, pp.355-360, 2015

〔学会発表〕(計 8 件)

永田和寿, 堀田広己, 原聡太郎, 北原武嗣,
山口隆司: 断熱塗料を用いた結露抑制に関する研究, JCOSSAR2015 論文集[A 論文], 第 8 巻, pp.355-36 第 8 回構造物の安全性・信頼性に関するシンポジウム, 日本学術会議(東京都・港区), 2015 年 10 月 14~16 日

内藤涼介, 永田和寿, 八木千里: 気象データを用いた愛知県内における結露評価の試み, 土木学会全国大会, 岡山大学(岡山県・岡山市), 2015 年 9 月 16~18 日

堀田広己, 永田和寿, 山口隆司, 北原武嗣:
塗装鋼板の結露発生現象に関する研究, 土木学会全国大会, 岡山大学(岡山県・岡山市), 2015 年 9 月 16~18 日

Kazutoshi Nagata: Evaluation Method of Dew Condensation of Steel Girders using Weather Data, The 8th Taiwan-Japan Workshop on Structural and Bridge Engineering, 京都大学(京都府・京都市), 2015 年 4 月 2~4 日

堀田広己, 永田和寿, 八木千里, 山口隆司:
断熱塗料を用いた結露抑制効果に関する研究, 土木学会中部支部研究発表会, 豊橋科学技術大学(愛知県・豊橋市), 2014 年 3 月 6 日

八木千里, 永田和寿, 内藤涼介: 気象解析を用いた愛知県内における結露評価に関する研究, 土木学会中部支部研究発表会, 豊橋科学技術大学(愛知県・豊橋市), 2014 年 3 月 6 日

田島俊輔, 永田和寿, 原聡太郎, 内藤涼介,
山口隆司: 橋梁の結露現象解明に向けた桁温度に関する計測および考察, 土木学会中部支部研究発表会, 岐阜大学(岐阜県・岐阜市), 2014 年 3 月 7 日

町田幸大, 永田和寿, 原聡太郎, 加納悠貴,
山口隆司: 橋梁の結露現象に関する計測および考察, 土木学会全国大会, 日本大学津田沼キャンパス(千葉県・習志野市), 2013 年 9 月 4~6 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永田 和寿 (Kazutoshi Nagata)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 40301238

(2) 研究分担者

山口 隆司 (Takashi Yamaguchi)
大阪市立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 50283643