

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	金属サンドイッチパネル設置による鋼桁橋の腐食環境改善に関する研究 (A study on improvement of corrosion environment of a steel plate girder bridge by installing metallic sandwiched panel)
氏 名 (Name)	立花 周作

社会インフラの老朽化は目に見える形で進行し、適切な維持管理や長寿命化の必要性が求められている。道路橋に着目すると、従来老朽化の目安として建設後 50 年を区切りとして論じられるケースが多い。しかし、全ての橋梁が経年とともに同じように老朽化するわけではなく、交通量や架橋環境などは個々の橋梁で異なるため、劣化（損傷）現象の進行程度も異なると考えられる。これは個々の劣化の原因を特定・排除し、補修などの適切な対策を実施すること、あるいは将来劣化が生じるであろうと考えられる部分への予防保全を行うことが、老朽化の速度を抑え、架け替えにともなう経済的な負担の削減、環境面への配慮に繋がる有効な手段となることを示している。

本論文では橋梁の中でも、緻密なさびの生成が架設地点の環境に大きく影響される耐候性鋼橋梁に着目した。耐候性鋼橋梁において保護性さびが生成されない場合や、周辺環境の変化により被覆防食などの検討が必要な場合に、従来の補修方法とは異なる鋼桁全体を金属サンドイッチパネルで覆う環境改善による防食の効果を明らかにすることを目的とする。塗装が施された鋼桁を金属サンドイッチパネルで覆う場合には、桁自身に防食措置が施されているため環境変化による防食進展のリスクは少ない。一方、金属サンドイッチパネルで覆われた桁内空間は、雨水による洗浄や風の流れによる乾湿効果が期待できないため、これまで耐候性鋼橋梁への採用は判断できなかった。そこで本論文では、供用中の耐候性鋼橋梁を想定した塩分の介在するさびの進行した耐候性鋼材（裸仕様）の腐食挙動と防食効果の有効性を示すことにより、金属サンドイッチパネルによる環境改善の防食効果を明らかにした。さらに、実際の架橋環境下でのライフサイクルコストを算出することにより、予防保全を視野に入れた金属サンドイッチパネル設置による経済面でのメリットについて考察した。

本論文は 6 章から構成されている。

第 1 章では、本研究の背景と目的、論文の構成と内容を述べた。

第 2 章では、鋼橋に用いられる防食方法に関する既往の研究を整理した。

第 3 章では、金属サンドイッチパネル内の環境因子抑制レベル、温湿度の変化、濡れ時間、ワッペン試験片の曝露試験評価に加えて、架橋近傍での遮へい曝露試験を行い、桁外の環境と比較することにより以下の知見を得た。

- 金属サンドイッチパネルに覆われた桁内は年間を通して 1 日の温度・湿度の変動幅が小さく、桁外の急激な気象変化には追従しない。また桁内気温と桁内露点の温度差が大きいことにより、ISO 9223 で算出した年間の桁内濡れ時間は、桁外の濡れ時間の 1/5 以下に抑えられるため、結露の抑制効果も大きくマイルドな環境下にある。
- 床版厚が薄く桁高が低い構造では、季節により桁内の気温上昇が避けられない場合もあるが、桁内の湿度は低く濡れ時間も大幅に減少するため、耐候性鋼橋梁を含めた鋼橋で防食効果が期待できる。
- 金属サンドイッチパネル設置後の桁内への飛来塩分は検知されなかったため、桁に付着した塩分は、桁塗

(和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度)
(about 800 words)

装後のヤード保管、海上輸送、桁架設時に付着したと考えられる。架橋後に水洗いなどで桁全体の付着塩分を除去することは現実的でなく、製作段階で鋼桁に一定の被覆防食を施すことが重要になる。

第 4 章では、鋼桁内部空間に塩分を内在しさびの進行した無処理耐候性鋼、補修塗装を施した小型試験体を配置し、腐食の推移と環境改善による防食効果および内面塗装簡素化（新設橋）の可能性について考察した。

- 1) 金属サンドイッチパネルで耐候性鋼橋梁を覆うことによる桁内気温の上昇、雨水による洗浄効果と風の流れによる乾湿効果が期待できない防食上のリスクを懸念したが、イオン透過抵抗法による評価区分で初期に未成長さび領域にある無処理仕様と無塗装仕様は、5 年間経過後もほぼ同領域内に存在することが検証できた。
- 2) ブラストによる素地調整を行った既設橋対応の小型試験体は、素地調整後も初期塩分が存在し、かつ、さび生成時に鋼板内部にまで付着塩分が侵入している場合も考えられるが、経年によるさび厚の増加速度が緩やかであり、海塩粒子の影響のない地域ではブラスト処理後に金属サンドイッチパネルを設置する方法も有効な選択肢になると考える。
- 3) 桁外との環境遮断による効果が確認できたものの、さびの進行を完全に抑えることは困難であることが明らかになった。しかし発さびの進行速度は抑制されており、近接目視点検などの維持管理を通し腐食状況に対応した適切な対策を講じることで、ライフサイクルコストの最小化を見据えた延命化が可能となる。

第 5 章では、臨海部河川上の新設桁に設計段階で金属サンドイッチパネルを計画（設置）したケースと供用開始後 50 年を経過した幹線鉄道上の既設桁に設置したケースの経済効果を検討した。

- 1) 工場製作時に選定する被覆のグレードにより、ライフサイクルコストの評価が異なるが、100 年の設計供用期間のうち 1 回でも塗り替え塗装が必要な場合は、金属サンドイッチパネルの環境改善による防食法の優位性を確認した。
- 2) 鉄道と交差する供用後 50 年を経過した跨線橋の法令で定められた近接目視点検費用（50 年間）の積み上げは、大型橋梁点検車でライフサイクルコストの 50%、架設足場の場合は 60%を超える結果となり、維持管理費の負担を増大させている。さらに点検時に発見された補修対応や床版剥落などの緊急対応を考えた場合、金属サンドイッチパネル設置（常設足場機能を活用）による経済面でのメリットも大きいことを確認した。

第 6 章では、本研究のまとめと今後の課題を述べた。

(様式 14 号)

学位論文審査の結果及び試験，試問の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	立花 周作
審 査 委 員	主 査： 麻生 稔彦
	副 査： 進士 正人
	副 査： 吉武 勇
	副 査： 中島 伸一郎
	副 査： 渡邊 学歩
論 文 題 目	金属サンドイッチパネル設置による鋼板桁橋の腐食環境改善に関する研究 (A study on improvement of corrosion environment of a steel plate girder bridge by installing metallic sandwiched panel)

【論文審査の結果及び試験，試問の結果】

鋼橋の延命化を図る際には、疲労と腐食への対応が必要となる。このうち、腐食については従来からの塗装による被覆防食に加えて溶射やめっき等の金属被覆も実用に供されている。また耐候性鋼材をはじめとする耐食性材料の使用も進んでいる。一方、供用後に当初予想できなかった腐食環境に起因する腐食が進行する場合には、鋼材周辺の腐食環境を改善する必要がある。そのために、鋼橋全体を金属板やFRP板により囲う防食法の開発が進んでいる。しかし、この方法による厳しい腐食環境下での定量的な環境改善効果の解明や環境改善後の腐食の進展に関する研究はこれまでになされていない。

本研究では、断熱材を2枚の金属薄板で挟んだ金属サンドイッチパネルに着目し、この金属サンドイッチパネルを実橋梁に適用した場合の腐食環境改善効果を調査している。また、実橋梁の金属サンドイッチパネルに囲まれた空間に腐食した耐候性鋼板を設置して暴露試験を実施し、初期塩分量の違いによる腐食進展状況を調査するとともに、各種補修方法の比較を行い、腐食が進行した耐候性鋼橋梁の金属サンドイッチパネル併用による補修方法について検討している。さらに、金属サンドイッチパネルを設置した場合の維持管理における経済的メリットについて、ライフサイクルコストによる新設から使用する場合と、供用途中から使用する場合について検討している。本論文は以下の6章から構成されている。

「第1章 序論」では、本研究の背景として、道路橋インフラのおかれた現状について概説し、防食の観点からの意長寿命化技術について述べ、本研究が対象とする環境改善による防食技術の必要性について述べている。

「第2章 防食方法に関する既往の研究」では、耐食材料による防食、被覆防食および環境改善に着目した防食法について、それぞれ既往の研究をレビューしている。

「第3章 金属サンドイッチパネル内の腐食環境評価」では、亜熱帯地域の臨海部に架橋された単純合成鋼桁橋の側面と下フランジ全体を金属サンドイッチパネルで覆っ

(様式 14 号)

た鋼桁内部空間の腐食環境について、実験により明らかにしている。その結果、金属サンドイッチパネルで覆われた空間内では飛来塩分は観測されないこと、外部と比較して年平均で3.6℃上昇し相対湿度は9.4%程度低下すること、温湿度の変動幅は年間を通じて小さいことが示された。また、JIS-SMA材と3%ニッケル鋼材によるワッペン試験から、5年間の腐食減耗量は0.005mm以下であり、腐食の進展が認められないことを示している。

「第4章 金属サンドイッチパネル内の耐候性鋼の腐食挙動」では、さびの進行した無処理の小型試験体、素地調整や補修塗装を想定した小型試験体を桁内へ配置し、初期付着塩分量、鋼材表面や塗膜と鋼材間に内在する塩分の影響、さびの進行速度から耐候性鋼の腐食挙動を考察している。その結果、初期付着塩分が少ない場合にはその後の腐食進行が抑制されるものの、初期付着塩分が多い場合には、外部からの腐食因子の供給が遮断される金属サンドイッチパネル設置後も腐食が進むことが示された。腐食が著しく進行した耐候性鋼橋梁に金属サンドイッチパネルを設置する場合には、設置後にブラスト処理等により塩分の除去が必要であること、およびその後の塗装は簡易化が可能であることを示している。

「第5章 金属サンドイッチパネルの経済効果に関する検討」では、金属サンドイッチパネルを建設時から設置したケースと供用開始後50年が経過した時点で設置した既設橋の2ケースについてライフサイクルコスト(LCC)を算出し、従来の被覆防食との経済性比較を行っている。その結果、いずれのケースにおいてもライフサイクルコストは金属サンドイッチパネルの設置により低減されることを示している。

「第6章 結論」では、本研究で得られた知見と成果を要約するとともに、今後の課題についてとりまとめている。

公聴会はオンラインで開催し、学内外から37名の聴講者があった。公聴会における主な質問は、金属サンドイッチパネル内での腐食の進展メカニズム、金属サンドイッチパネルを適用するにあたっての指標、高温となる金属サンドイッチパネル内での点検の時期と時間、内面塗装の簡素化の可能性、金属サンドイッチパネルの形状決定の経緯と改善点、などであった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士(工学)の論文に十分値するものと判断した。なお、審査委員会より英文題目をsandwich panelからsandwiched panelに変更するように指示がなされた。また、単位取得退学後1年以内の申請のため、外国語及び専攻学術に関する諮問を免除した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 計2編)

- 1) 立花周作, 麻生稔彦, 金属サンドイッチパネル製カバーによる防食法の腐食環境改善効果に関する検証, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol.76 No.3, pp.456-466, 2020.
- 2) 立花周作, 麻生稔彦, 金属サンドイッチパネルに覆われた鋼桁空間における耐候性鋼の腐食挙動, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol.77 No.2, pp.229-242, 2021.