

氏 名（本 籍）	ヤナギサワ ノリフミ 柳澤 則文（兵庫県）
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	工博乙第56号
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第4条第2項該当者
学 位 授 与 の 年 月 日	平成28年3月14日
学 位 論 文 題 目	火災時における鋼合成桁の終局耐力と耐火対策に関する研究
論 文 審 査 委 員	（主査）教 授 栗田 章光 教 授 井上 晋 教 授 西村 泰志 教 授 林 健治

学位申請者氏名 柳澤 則文

論 文 題 目 火災時における鋼合成桁の終局耐力と耐火対策に関する研究

論 文 の 内 容 の 要 旨

近年、日本、アメリカおよびドイツ等において主にタンクローリー車の横転・炎上により、一般橋梁や高架橋が大規模な火災損傷を受ける事例がみられるようになってきた。例えば、2008年に首都高速5号池袋線で、タンクローリー車の横転・炎上により、橋桁およびコンクリート橋脚が大きな被害を受け、大規模な車線規制と橋桁の取り替えが約2ヶ月にわたって行われ、その経済的な損失は計り知れないものであった。このように橋梁が火災を受け損傷した場合、被災した橋梁の損傷状況や安全性を迅速かつ適確に判断し、通行の可否を判断する必要がある。

このような背景のもとで、本研究では、鋼合成桁の加熱実験と差分法による数値解析などを通じて、火災時における鋼桁およびコンクリート床版の受熱温度を把握するとともに、性能照査において必要とされる終局耐力に関する種々の相関式を誘導し、安全性の評価法や落橋温度の推定方法を提示している。さらに、誘導した終局耐力相関式をもとに、火災により実際に落橋した事例をモデルケースとし、耐荷力の推定を行い落橋要因に関する検討を行っている。また、火災事故が懸念される橋梁においては、その耐火対策として、下面に耐火工を施すといった対策も今後必要と考えられることから、著者らが考案した橋梁用耐火パネルの耐火性能について検証を行っている。本論文は、このような火災時における鋼合成桁の終局耐力と耐火対策に関する一連の研究成果をとりまとめたものである。

本論文は、8章から構成されており、各章における要点は以下のとおりである。

第1章では、研究の背景、研究目的および本論文の構成が述べられている。

第2章では、橋梁の火災事例の調査結果が示されるとともに、国内外の代表的な3つの被災事例について、出火要因、部材の最大受熱温度、損傷状況ならびに調査、補修・補強、架け替え方法などが述べられている。

第3章では、鋼桁およびコンクリート床版などの受熱温度の算定に必要な火災荷重の設定方法や、既往の試験結果およびユーロコード（Eurocode）より加熱（高温）時および加熱冷却後の鋼材とコンクリートの力学特性がまとめられている。さらに熱伝導解析を行う上で必要な鋼材とコンクリートの種々の熱物性値が示されている。

第4章では、火災時の鋼合成桁の受熱温度を把握することを目的として、桁下で火災が発生した場合を想定した加熱実験が行われ、解析値と比較・検討を行った結果が述べられている。加熱実験の結果から、鋼桁下フランジおよびウェブの受熱温度は、直接、炎に曝されているため、著しい温度上昇が見られるものの、床版のコンクリート部分では、温度上昇が加熱面付近に限られ、全体として温度上昇は小さいことが明らかにされている。また、一次元差分法により部材の受熱温度を算定した結果、炎に曝された鋼桁下フランジおよびウェブの受熱温度は、比較的精度良く推定することができるが、コンクリート床版およびコンクリート床版に接する上フランジの受熱温度については、実験値と比べ算定値が大きく、より精度良く受熱温度を推定するには、コンクリートの含水率による比熱変化をできるだけ忠実に評価することが重要となる。

第5章では、高温時における合成桁横断面の終局耐力に関し、曲げモーメント (M) とせん断力 (Q) が同時に作用する場合の $M-Q$ 相関式を基本に、鋼合成桁を用いた斜張橋やポータルラーメン橋のように軸方向力 (N) をも受ける場合を想定し、 $N-Q-M$ 相関式が誘導されている。数値計算の結果、 M と Q が同時に作用する桁橋のような構造と比べ、斜張橋やポータルラーメン橋のような N (圧縮力) と M の作用が卓越する場合、あるいは $N-Q-M$ が同時に作用する場合では、軸圧縮力 N を受けることにより、床版コンクリートの有効断面が増大するため、曲げ耐力は上昇する傾向にあるが、温度の上昇に伴い曲げ耐力は低下することが明らかとなった。

第6章では、**第5章**で誘導された終局耐力に関する相関式をもとに、**第2章**で示されたアメリカでの落橋事例をモデルケースとし、設計図面といくつかの仮定にもとづき、火災による落橋要因として4つの破壊形態を想定し、耐力力の計算が行われ、落橋要因に関する検討結果が述べられている。検討の結果、落橋要因として最も可能性が高い破壊形態は、支持桁支点上のせん断破壊であることが明らかにされている。

第7章では、耐火対策として、まず、橋梁用の耐火工 (耐火パネル) の開発を進めるにあたり、耐火パネルを構成するフレーム構造と、使用する耐火材の種類やその組み合わせを検討するための基礎的な加熱実験結果が示されている。つぎに、実橋への適用に向けたフレーム構造による耐火パネル単体ならびに鋼合成桁に耐火パネルを取り付けた加熱実験が実施され、その結果が述べられている。実験結果から、耐火パネル単体による加熱実験では、空気層の温度が許容温度である 350°C 以下に抑えることができ、十分な耐火性能を有することが確認された。また、この実験結果を踏まえ、耐火パネルを取り付けた鋼合成桁の加熱実験と数値解析が行われた結果、鋼桁の受熱最高温度は、許容温度として設定した 350°C を十分に満足することが確認された。

第8章では、本研究での成果が要約されるとともに、今後の課題が述べられている。

学位申請者氏名 柳澤 則文

論文題目 火災時における鋼合成桁の終局耐力と耐火対策に関する研究

論文審査の結果の要旨

建築構造物に対する耐火設計は建築基準法で義務づけられているため、その研究は今日まで盛んに行われてきており、設計規準類も整備されている。一方、土木構造物を対象とする火災研究は、トンネルを除いて被災事例が少ないため、今日までほとんどなされてこなかった。それゆえ、橋梁の具体的な耐火設計規準類はなく、その基本条項を示すにとどまっているのが現状である。ところが、近年においてアメリカや日本等でタンクローリーの横転・炎上により主として高架橋が甚大な被害をうける事故が連続して発生した。とりわけアメリカでは落橋を経験し、設計規準類や被災診断マニュアルの整備とともに耐火パネルの開発が要望されつつある。

このような背景のもとで、本研究は一般橋や高架橋で適用事例の多い鋼合成桁を対象に高温時の終局耐荷力に関する断面力相関式を提示するとともに、橋梁用の耐火パネルの開発を目的に実施された。本研究で得られた主な成果を列挙すると以下のとおりである。

- (1) 近年における国内外での主な橋梁火災事例が取り纏められとともに、耐火設計に資する重要なデータが示されている。
- (2) 大型の加熱炉を用いて鋼合成桁の加熱実験が実施された結果、鋼下フランジとウェブの受熱温度は周辺が直接に炎に曝されるため急激に上昇するが、コンクリート床版の受熱温度は加熱面付近の浅い領域に限定されることが明らかになった。
- (3) 耐火材を含む鋼合成桁の受熱温度の推定は、簡易な一次元差分法で可能である。
- (4) 鋼合成桁横断面の高温時における終局耐荷力に関し、 $M-Q$ 相関式を基本として、 $N-M$ 相関式や $N-Q-M$ 相関式が誘導され、設計に有用な種々の相関図が示されている。ここに、 N 、 Q および M は、それぞれ軸方向圧縮力、せん断力および正の曲げモーメントを表す。
- (5) 数値計算例として、アメリカでの落橋事故例に上記の耐荷力相関式が適用され、落橋要因と落橋温度の推定結果が示されている。
- (6) 鋼合成桁の防火対策として新形式の耐火パネルが考案され、パネル単体および合成

桁に耐火パネルを取り付けた状態で加熱実験された結果、耐火パネルは設計上必要とされる耐火性能を満足し、実用化が可能であることが確認されている。

以上のように、本論文は我が国において使用頻度の高い鋼合成桁を対象に高温時の耐荷力評価法と耐火対策に関する基本的な知見を提供している。これらの成果は、今後のわが国で必要とされる各種橋梁の耐火設計規準の作成に寄与するだけでなく、火災診断マニュアルの作成や防火対策を行う上においても有用となるものである。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。