(54) 鋼・コンクリート複合トラス鉄道橋の 温度変化挙動に関する研究

奥村 駿1・橋本 国太郎2・谷口 望3・由井 洋三4・杉浦 邦征5

¹学生会員 京都大学大学院工学研究科 修士課程(〒615-8540京都市西京区京都大学桂)
E-mail:okumura.shun.83z@st.kyoto-u.ac.jp
²正会員京都大学大学院工学研究科 助教(〒615-8540京都市西京区京都大学桂)
E-mail:hashimoto.kunitaro.6s@kyoto-u.ac.jp
³正会員前橋工科大学社会環境工学科 准教授(〒371-0816群馬県前橋市上佐鳥町460番地1)
E-mail:n-tani@maebashi-it.ac.jp
⁴フェロー会員由井技術士事務所(〒182-0024東京都調布市布田5丁目21番地4)
E-mail:yui-eng@jcom.home.ne.jp
⁵正会員京都大学大学院工学研究科 教授(〒615-8540京都市西京区京都大学桂)
E-mail:sugiura.kunitomo.4n@kyoto-u.ac.jp

現在,複合構造物が鉄道や道路の橋梁において多く用いられている.特に鉄道橋においては鋼下弦材とコンクリート床版 を合成したSRC床板を用いた複合トラス橋が実用化されている.この複合トラス橋では,桁高を抑えることができ,施工性 の点から考えても合理的であるが,コンクリート部材や鋼部材のそれぞれの温度変化に対する挙動が橋梁全体にどのような 影響を与えるかを明確に把握できていない.そこで本研究では,実際に架設されている複合トラス橋に対して,床版内の鉄 筋や鋼部材に生じる温度およびひずみを計測し,そのデータを用いてFEM 解析モデルを構築し,複合トラス橋の温度変化 挙動を再現した.解析結果から,特に温度上昇が大きかった下弦材上フランジにおいて大きな応力が発生していることがわ かった.しかし,これらは何れも降伏に至るようなものでないこともわかった.

Key Words : SRC slab, thermal behavior, steel-concrete composite truss

1. はじめに

近年,鉄道橋において,図-1に示すような縦桁を保有 せず,横桁をコンクリート中に埋め込むことで床版とし ての剛性を保つSRC床版を有する複合トラス橋が開発さ れ,実構造物に用いられている.SRC床版は,従来のコ ンクリート床版を横桁および縦桁の上フランジ上に打設 するRC床版形式に比べ,床高を抑えられることから桁 高も低くすることができる.また,従来の形式に比べて 縦桁を省略することで鋼重を低減でき,横桁をコンクリ ートで覆うことにより,塗装の塗り替え等のメンテナン スの軽減が期待できる^{1)~3}.これらの長所から,この構 造形式は合理的であると言えるが,コンクリート部材や 鋼部材の温度変化などによる挙動が構造物全体にどのよ うな影響を及ぼしているか,明確に把握できていないの



が現状である.特に本研究で対象にしているK橋では, 鋼部材に耐候性鋼材を使用しており,部材表面が焦げ茶 色となっている.その結果,日照量が多い昼間では特に 大きな温度上昇が起きている.そこで,これら鋼材部分 の大きな温度変化がコンクリート部材及び橋梁全体に与 える影響を把握するために,本研究では,SRC床版を用



図-2 計測断面位置およびゲージ貼付位置

いた鋼・コンクリート複合トラス橋のSRC床版内の鉄筋 および下弦材の上フランジと下フランジの温度・ひずみ 計測および,FEMによる橋梁全体の温度変化挙動の解析 を行い,両部材に発生する応力やひずみ等を詳細に検討 する.

2. 複合トラス橋の温度およびひずみ計測

複合トラス橋の鋼部材とコンクリート部材の温度挙動 を把握するために実際の橋梁を対象として計測を2回行 った.1回目の計測(2008年度実施)では下弦材,コン クリート床版内部の鉄筋の温度,ひずみの計測を行った. 2回目の計測(2012年度実施)では、1回目で計測を行って いない斜材等のトラス部材の外部・内部や各面の温度計 測を行った.

(1) 計測対象橋梁

計測を行った橋梁は,図-2(a) に示す下弦材および横桁などの床組みとコンクリート床版を一体化した SRC 構造を有しており,下弦材,上弦材,斜材や上横構等の 鋼材部分に耐候性鋼材を使用した4径間連続の下路トラ



54 - 3

ス桁2連の橋梁である. なお, 耐候性鋼材の表面には焦 げ茶色のさび安定化処理剤を塗布している.

(2) 計測箇所について

1回目の計測では、図-2(a)に示すように橋梁のP7橋脚 とP6橋脚間の計測断面Cおよび断面C^{*}に、ひずみゲージ および熱電対を設置した.この断面設定については、添 接部や横桁、ダイヤフラムの位置を避け、桁の全体的な 挙動を得ることができる位置とした.計測断面位置およ び計測断面内のひずみゲージ貼付位置を図-2 (b)に示す.

図-2 (b) のアルファベットは、C'-aおよびC'-cが下弦材、 C'-dがコンクリート内に位置している鉄筋を表しており、 計測は下弦材の橋軸方向ひずみと温度、床版内の鉄筋の 橋軸方向ひずみと温度について行った.

1回目の全計測期間は2008年9月5日~2009年2月17日の 165日間で行われた.ひずみゲージを設置した9月5日の 午前3時を初期値(ひずみ0)とし,伸びを示すひずみを 正としている.また,計測にあたってサンプリング周期 は10分間隔で行った.

2回目の計測では、計測断面C^{*}付近に位置している上下 流側の箱断面部材(斜材)内外部の上下面、そして側面 に温度ロガー(株式会社エムケー・サイエンティフック 社製EL-USB-2)を設置し、温度のみ計測を行った.

図-2 (c) は箱部材(斜材) に設置している温度ロガー の位置を表しており, G-a-1およびG-a-2は斜材の上面, Gb-1およびG-b-2は斜材下面, G-c-1およびG-c-2は斜材西側 側面, G-d-1およびG-d-2は斜材東側側面である. また, 2 回目の計測は2012年3月9日~2013年6月5日の453日間で行 われた.

(3) 計測結果

日温度変化を確認するために、計測期間中に最も高い 部材温度を記録した日を含む3日間(2008年9月5日3:00-9 月8日3:00)の温度挙動、ひずみ変化のデータを図-3 (a)~(d)に示す.

2回目に行った計測も図-3 (a)~(d) 同様,最も高い部材 温度を記録した日を含む3日間(2012年7月26日~7月29日) の温度データを図-3 (e) および (f) に示す.

下弦材の上フランジ (C-a-1,C-a-2) と下フランジ (C-c-1,C-c-2),床版内の鉄筋 (C-d-1)のひずみはい ずれも橋軸方向の挙動を示している.鉄筋についてはひ ずみゲージが正常に作動していたC-d-1の値を用いてい る.

図-3 (a) の温度変化をみると、日照量が多い昼間では、 下弦材上フランジで最大60℃程度の値を記録している. これは、橋梁の鋼材部分に耐候性鋼材を用いており、鋼 材の色が焦げ茶色であったため、その影響を受けて大き な温度上昇が起こったと考えられる.一方、下弦材の下 フランジでは最大でも温度が35℃程度までしか上昇しな かった.これは、下フランジに日光が当たらず、日照量 が上フランジに比べ少なかったためと考えられる.また、 図-3 (a) からもわかるように、上下フランジ間での温度 差は大きく、最大で約30℃も生じていることがわかった. 鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物⁴による と、日中の気温変動の大きい夏季では、上下フランジ間 で標準で15℃の温度差を考慮して、設計を行っている. しかし、上記の計測結果では設計値のおよそ2倍もの温 度差が生じている.鉄筋の温度変化の傾向は下弦材と似 ているが、急激な温度変化はみられなかった.また、下 弦材の温度変化と鉄筋の温度変化において、ピーク時に 多少のずれがみられる.これは、鉄筋がコンクリート床 版内に位置しているため、床版内の鉄筋に温度が伝わる までに時間差があったためと考えられる.

次に、橋軸方向のひずみを示している図-3 (b) をみる と、下弦材については、上下フランジそれぞれで温度上 昇時に圧縮ひずみが生じている.特に温度上昇が大きい 上フランジにおいては、最大で-370 µ のひずみが発生し ている.これは、本来温度上昇に伴い膨張すると考えら れる下弦材が支承に拘束されていることから、膨張が抑 えられ部材に圧縮力が作用したためと考えられる.

一方,鉄筋のひずみについては,温度上昇に伴いひず みが引張側に増加し,温度下降時にひずみの変化量は0 (初期値)に近づいている.床版内の鉄筋はコンクリー トが温度上昇時に熱膨張するため,その影響によってひ ずみが引張側に増加したと考えられる.

斜材の温度変化を示している図-3 (e) および (f) より, 斜材の上面で最大でおよそ55℃,そして下面で最大40℃ まで上昇していることがわかる.斜材の側面西側では斜 材上面に比べ,温度は低いが最大で50℃まで上昇してい る.

以上の結果から,各部材において最大で50℃以上の温 度を記録し,温度上昇時には下弦材上面では大きな圧縮 ひずみが発生することがわかった.

3. FEM解析による検討

(1) FEM解析モデル

表-1 各部材材料定数

		コンクリート	鋼材
弹性係数	(N/mm ²)	42832	205000
ポアソン比		0.2	0.3
降伏応力	(N/mm ²)	-	245
線膨張係数	(/°C)	1.00E-05	1.00E-05
密度	(kg/mm ²)	2.36E-06	473.34



図-4 解析モデルの全体図

本研究のFEM解析では、汎用解析コードABAQUS[®]を使用した.解析モデルは、測定断面を含むA2橋台P6橋脚の2径間をモデル化し、計測断面C'を有するL14L16間においては細部までモデル化するために、橋軸方向・橋軸直角方向における鉄筋を全て配置した.

L14-L16間のみ鉄筋をモデル化したのは、計算負荷の低 減をはかるためである.図-4では、解析モデルの全体図 を示している.また、図-5は図4で赤い点線に囲まれて いる部分を拡大したものであり、詳細な鉄筋の配置を確 認しやすくするために、床版を取り除いている.また、 下弦材と斜材の接合部ではガセットプレートをモデル化 し、さらにフィレットなどを再現しており、上弦材と支 材、上横構の接合部でもガセットプレートをモデル化し ている.なお使用した要素としては、床版コンクリート をソリッド要素、鉄筋、横桁をビーム要素、そして下弦 材、鋼板ジベル、斜材、上弦材、上横構をシェル要素で モデル化した.実橋モデルは弾性範囲で挙動するものと し、弾性解析を実施した.また、各部材における拘束条

件としては、下弦材とコンクリート床版を直接結合する のではなく、コンクリート床版に下弦材に結合している 鋼板ジベルを埋め込むものとした.下弦材と横桁の接合 部、下弦材と斜材の接合部、そして上弦材と支材、上横 構の接合部は剛結とした.

各支承部節点にはバネ要素を設定し、ゴム支承の水平、 鉛直方向の剛性を再現した.また解析モデルに使用して いる、鋼部材とコンクリート部材の材料定数を表-1 に 示す.

コンクリートの材料定数については、対象橋梁である K橋の示方配合を参考にした.K橋で用いているコンク リートは鋼繊維補強膨張コンクリートである.

(2) 解析条件

計測した温度データを参考に,様々な温度状態時の応 力やひずみの状態を検討するため,解析モデルに与える

図-5 解析モデルの鉄筋位置詳細図

表-2 温度導入パターン

温度状態 各部材	Initial	Step- 1	Step- 2	Step- 3	Step- 3-2
鉄筋 (℃)	25	27.5	30	30	30
下弦材上フランジ(℃)	25	40	60	50	60
下弦材下フランジ(℃)	25	30	35	35	35
下弦材側面 東側 (℃)	25	40	40	40	40
下弦材側面 西側 (℃)	25	30	40	40	40
斜材上面 (℃)	25	40	60	50	60
斜材下面 (℃)	25	30	40	35	40
斜材側面 東側 (℃)	25	40	50	42.5	47.5
斜材側面 西側 (℃)	25	35	50	50	60

温度は、計測結果を参考にいくつかの導入パターンを 決定した.

表-2 に示す導入パターンにおいて、Initialは計測機器 を設置した時刻の温度状態を表している. 解析において は、各Stepにおける温度とInitialの温度変化量を与えた. 導入パターンにおいて、各Stepの状態を以下に説明する.

Step-1では、日が昇り始める午前の状態を想定しており、東側は直射日光により、日照量が多いため温度が上昇しやすい下弦材上フランジ、斜材の上面に加えて下弦材側面東側と斜材の側面東側の温度を他の部材に比べて高く設定した.また、午前の時間帯では気温が最高気温まで上がらないため、最も高い部材の温度でも40℃とした.

Step-2では、一日の中で最も気温が高い正午から14時 付近を想定した.計測結果からも、下弦材上フランジで は最大60℃付近まで上がっていたため、60℃と設定した. 斜材の上面についても60℃付近まで、上昇していたこと から、下弦材上フランジと同様の温度を与えた.そして、 下弦材、斜材の側面についてはそれぞれ、下弦材上下フ ランジ、斜材上下面の平均値を与えた.

Step-3では、14時から日没までの時間を想定した.正 午付近の時間帯に比べ、気温が全体的に下がっているた め,最も温度が高い部材においても50℃と設定した.また、太陽が西側に位置しているため、下弦材側面の西側、 斜材側面西側の温度を下弦材上フランジと同じ値とした. 東側の斜材、下弦材においては、気温は高いが直接日が 当らないことを考え、下弦材上下フランジ、斜材上下面 の平均値を与えた.

Step-3-2は、Step-3同様に14時から日没までの時間を想 定しているが、夏季では夕方の時間帯でも高い気温状態 の場合があるため、太陽が西側に位置していることを想 定し、かつ気温が最も上昇している状況を設定した.そ のため、西側の部材の温度が高く、Step-3時の気温設定 を全体的に高くしたものとなっている.

各導入パターンにおいて,Step-1以外,全て鉄筋の温 度は30℃に設定しているが,これは計測結果から,日中 の鉄筋温度が大体30℃付近を示していたためである, Step-1において,温度がやや低めなのは、コンクリート 部材が鋼部材に比べて温度が上がる速度が遅いため, Step-1では,鉄筋の温度を低く設定している.また,こ の鉄筋の温度を解析では、コンクリート床版の温度とし て扱う.

上弦材,支材,上横構の上下フランジについては,各 パターンの下弦材上下フランジと同様の値に設定した. それらの部材の側面についても,斜材側面の値と同様の 値を用いた.

(3) FEM解析結果

a) 計測結果と解析結果の比較

ここでは、計測結果から得られたひずみと解析結果から得られたひずみの比較を行う.

計測結果から、下弦材上フランジにおいてひずみが突 出している日時が正午付近であることがわかる.そして、 その時刻における温度状態は前節で述べた解析条件の Step-2とほぼ同様であるため、2008年9月5日正午付近に おける各部材のひずみと解析条件Step-2におけるひずみ の結果をそれぞれ対象にし、それぞれの値を比較するこ ととした.それぞれの結果を表-3に示す.

表-3に示すように計測結果と解析結果と多少の誤差は あるが、ほぼ一致している.従って、解析モデルは実橋 の挙動をほぼ再現できていると考えられる.

b) 各パターンにおける応力状態

Step-1~3-2までの相当応力コンターを図-6に示す. Step-1 の応力コンター図から、日が当っている東側で応力20~ 30N/mm²を示している.下弦材、上弦材上フランジも東 側の部材同様応力20~30N/mm²となっている.一方、日 陰部分である西側では、応力が最大で10N/mm²程度と日 なた部分に比べて、低くなっている.午前から正午まで を想定しているStep-1では全体的に温度設定が低いた め、全体的に応力値は低い結果となった.

Step-2では、正午付近で太陽のは真上に位置している 状態を想定している。そのため、東側と西側で温度差は ないものとして考えている。しかし、気温が高いため各 表-3 ひずみの計測値と解析値

ひずみ(με)	計測値 2008/9/511:20	解析值 step-2	
鉄筋	73	74	
下弦材上フランジ	-361	-329	
下弦材下フランジ	-52.5	-53.9	





西側

東側

東側



部材で高い応力状態が見られる.下弦材の上フランジで 60N/mm²程度,上弦材の上フランジでは50N/mm²程度,

そして斜材でも10N/mm²程度の応力が発生している.こ れらの応力値は全体的に,危惧するほどではないが温度 変化による挙動のみで,この大きさは注意すべきと考ら れる.

Step-3では,正午から日没までの状態を想定している. そのため,直射日光を受ける西側の部材では応力が大き く,下弦材側面西側では40N/mm²,斜材側面西側でも箇 所によって10~15N/mm²程度発生している.また,上弦 材では全体的に30N/mm²,下弦材上フランジでも温度が 高いため40N/mm²程度の応力を示している.一方,直接 日光が当らない下弦材側面東側では応力が20N/mm²程度 と小さくなっている.しかし,この時刻の気温は全体的 にまだ高いため、設定した解析条件以上に部材温度が上 がる場合が考えられる.そのため、日なた部分や日陰部 分においても、Step-3以上の応力が発生する可能性があ る.

Step-3-2では、Step-3同様に西側で大きな応力が発生している.下弦材側面西側で60N/mm²,上弦材側面西側で 650N/mm²程度発生している.そして、同様に気温が高い下弦材上フランジでも65N/mm²程度発生しているが、上弦材上フランジでは40N/mm²とやや低い応力状態となっている.しかし、西側の上弦材のガセットプレート部分において最大で70N/mm²と高い応力が発生していることがわかる.

c) 各パターンにおける橋軸方向応力

下弦材上下フランジで温度およびひずみを実橋で計測



した箇所の各パターンにおける橋軸方向応力を図-7に示 す.また,解析結果より東側と西側で値に差があまり見 られなかったため,図-7では上下フランジともに東西側 の平均値で表している.

気温が高くないStep-1では、全体的に大きな応力は見 られなかった.しかし、正午付近を想定しているStep-2, そして正午から日没まで想定しているStep-3およびStep-3-2では、下弦材上フランジで大きな応力が発生している. 特にStep-2およびStep-3-2の下弦材上フランジでは70~ 80N/mm²程度の応力が発生している.しかし、4パター ンいずれも温度がそこまで上昇していない下フランジで は大きな応力はみられなかった.

またダイヤフラムが設置している箇所では、上下フラ ンジともに応力が小さくなっている.

4. まとめ

本研究では.SRC床版を有する複合トラス橋を対象に 温度およびひずみの計測を行い、その結果を用いてFEM 解析を行うことで、複合トラス橋の温度変化による挙動 の把握を試みた.得られた結果を以下にまとめる.

 下弦材、床版内の鉄筋の計測を行った結果、下弦材 上フランジが最大で約60℃程度に上昇していること がわかった.またそれにより、上下フランジ間で約 30℃の温度差が発生し、これは設計で考慮する温度 差の約2倍にもおよんでいることがわかった. 2)解析の結果、気温が高い正午や日没直前を想定した場合のとき、温度が特に上昇する上弦材や下弦材で70~ 80N/mm²程度の高い応力がみられた.これらはいずれも降伏に至るようなものではないが、温度変化のみでここまで応力が発生しているのは注意すべき事象だと考えられる.

今後は,活荷重や死荷重が合わせて作用した場合の 危険個所の特定を試みる.

謝辞:本研究を進めるにあたり,実験データの提供をは じめ,多大なご協力を頂いた西日本旅客鉄道(株)矢島秀 治氏ならびに和歌山工事事務所関係各位に深く感謝の意 を表します.

参考文献

- 谷口 望,相原修司,池田 学,武安直喜,矢島秀治:SRC 合成床版を用いた下路トラス橋の設計手法に関する研究, 合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集,No.1, Vol.6, pp.3.1-3.8, 2005.
- 2) 矢島秀治,市川篤司,村田清満,北園茂喜:SRC床版床組構 造の鋼鉄道下路トラス橋への適用に関する実験的研究,土 木学会論文集,No.731,I-63, pp.283-298, 2003.4.
- 3) 矢島秀治,内田裕市,六郷恵哲,北園茂喜,市川篤司:SRC 床版床組構造の鋼鉄道下路トラス橋の設計手法に関する考 察,土木学会論文集A, Vol.62, No.1, pp.53-67, 2006.1.
- 4) 国土交通省鉄道局監修,鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物 等設計標準・同解説,鋼・合成構造物,2009.
- 5) Dassult Systems Simulia: ABAQUS User's Manual, Ver 6.8, 2008.

STUDY ON THERMAL BEHAVIOR OF STEEL CONCRETE COMPOSITE TRUSS RAILWAY BRIDGE

Shun OKUMURA, Knitaro HASHIMOTO, Nozomu TANIGUCHI, Yozo YUI and Kunitomo SUGIURA

Recently composite structures have been used for railway and road bridges in Japan. Especially steel-concrete composite truss bridges used SRC slab have already put to practical use in railway bridge. Though the composite truss bridge has many advantages as rational structure, it is not understood that how thermal behavior between steel members and concrete members affects the behavior of whole bridge.

In this study, temperature and strain of steel bar in SRC slab and steel members in real composite truss bridge are measured, and the composite truss bridge were modeled by FE analysis based on the measured results. From the analysis it is found that high stress are generated at the top flanges in the lower chord members which are recorded high temperature. But the stress value is lower than yielding point of the steel members.