

論文

鋼床版デッキプレート溶接部の残留応力低減に関する一検討

内田大介*, 森猛**, 曾我明***

*博 (工), 法政大学准教授, 都市環境デザイン工学科 (〒160-0843 東京都新宿区市ヶ谷田町 2-33)

** 工博, 法政大学大学院客員教授, デザイン工学研究科 (〒160-0843 東京都新宿区市ヶ谷田町 2-33)

*** 工修, 三井 E&S 鉄構エンジニアリング技術本部 (〒550-0004 大阪市西区靱本町 1-5-15 第二富士ビル 10F)

鋼床版のデッキプレート-トラフリブ溶接線に発生するき裂の一つに溶接ルート部から発生し、デッキプレートに進展するデッキ進展き裂がある。この疲労き裂は溶接ルート部の引張残留応力に起因し、焼鈍炉を用いた残留応力低減により、疲労耐久性が大幅に向上することが確認されている。本研究ではセラミックファイバーヒータを用いてデッキプレート上面を部分的に加熱する効果について、モデル試験体を対象とした熱弾塑性解析や部分加熱試験により引張残留応力低減の可能性を確認した。しかし、実物大試験体を用いた疲労試験では、ヒータの性能不足等もあり期待した効果を確認することができなかった。

キーワード：鋼床版, デッキ進展き裂, 残留応力, 部分加熱

1. はじめに

鋼床版のデッキプレート (以下、デッキ) -トラフリブ溶接線では、2000 年頃よりルート部の先端を起点として、デッキへ進展するデッキ進展き裂が報告されている¹⁾。このき裂は縦リブ支間部から発生するき裂と、縦リブと横リブ交差部から発生するき裂に大別されるが、ここでは発生応力がより大きいとされる²⁾、縦リブと横リブ交差部のデッキ進展き裂に着目する。

当該き裂に対しては、これまでも数多くの研究が行われており¹⁾、著者らもき裂の進展性状やスカラップの有無が疲労強度の及ぼす影響を明らかにする^{3,4)}とともに、このき裂は溶接ルート部の引張残留応力に起因し、焼鈍炉を用いた残留応力低減により疲労耐久性が大幅に向上することも確認した⁵⁾。しかし、実際の鋼床版橋梁の製作を考えると、焼鈍を施すことは困難である。そこで、部分加熱による引張残留応力除去を考え、より現実的な加熱方法として、ある程度大型化が可能であるセラミックファイバーヒータを用い、デッキ上面から加熱することを考えた。なお、部分加熱による溶接継手の疲労強度改善については、アセチレンガスを用いた線状加熱より、面外ガセット溶接継手試験体の疲労強度が改善したことが報告されている⁶⁾。しかし、この方法では板厚 8mm の主板の加熱箇所の板裏面が 700°C となるまで加熱が必要とされており、加熱部の鋼材へ及ぼす影響などを別途検討する必要があると思われる。また、廣畑ら^{7,8)}はシート状のアルミナセラミックヒータによる加熱

で、面外ガセット溶接継手試験体の疲労強度が改善されたことを報告している。さらに、トラフリブを溶接した小型試験体で溶接線近傍の残留応力の緩和も確認しているが、疲労耐久性向上効果の確認については今後の課題としている。

本研究では工場製作時にセラミックファイバーヒータを用いてデッキ上面を加熱することによる、デッキ-トラフリブ溶接線の残留応力を低減と疲労耐久性向上の可能性の確認を目的とした。そのために、部分加熱した小型試験体と実物大の鋼床版部分モデル試験体 (以下、鋼床版試験体) の残留応力計測、鋼床版試験体を対象とした熱弾塑性解析を実施した。さらに、部分加熱した鋼床版試験体の疲労試験を実施した。

2. 熱弾塑性解析

2.1 解析モデル

解析対象は著者らがこれまでの検討^{3,5)}に用いてきたものと同じトラフリブ 2 本を有する縦リブ-横リブ交差部の部分モデル試験体であり、トラフリブ内の直上にシングルタイヤが載荷される場合を想定することによりデッキ進展き裂の再現が可能である。ここで対象とするモデルは、図-1 に示す現行の道路橋示方書を満足するデッキ厚が 16mm でスカラップを省略したものである。熱弾塑性解析は、まず、試験体組立て時の溶接による残留応力解析を実施し、その後のステップを文献⁵⁾で実施した焼鈍炉を用いた残留応力除去焼鈍と、デッキ表面

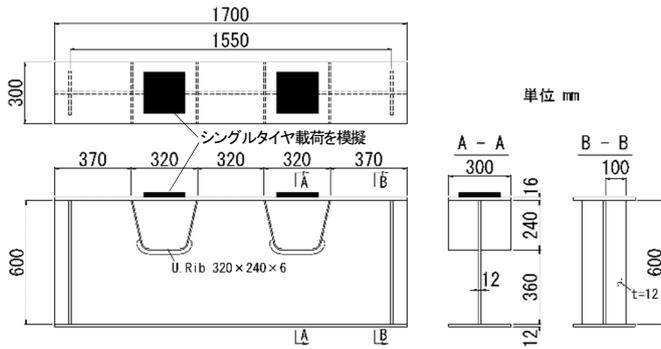


図-1 鋼床版試験体

表-1 物理的性質

温度 °C	比熱 J/kg°C	熱伝導率 W/mm°C	密度 × 10 ⁻⁶ kg/mm ³
15	465	0.0718	7.85
100	477	0.0678	7.82
200	536	0.0611	7.79
300	586	0.0557	7.76
400	632	0.0490	7.72
500	682	0.0440	7.68
600	787	0.0393	7.65
700	963	0.0347	7.61
800	879	0.0301	7.58

表-2 溶接条件

部 位	パス数	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/分)
デッキトラフリップ	1	355	39	40
その他	1	270	34	28

をセラミックヒータで部分加熱することを想定した2種類とした。解析には、汎用有限要素解析プログラム ABAQUS Ver.6.11-3 を用い、熱と応力を連成させず、非連成の解析を行った。鋼材の物理的性質と機械的性質の温度依存性は、文献9),10)を参考として表-1と図-2に示すように定義している。なお、物理的性質のうち熱伝導率は便宜上、 $1.5 \times 10^5 \text{W/mm}^2 \cdot \text{K}$ で一定とした。真応力-真ひずみの関係は bi-linear とし、塑性域での真応力-真ひずみの勾配は 0.01N/mm^2 とした。常温時の降伏応力は 403N/mm^2 、ヤング率は $2.06 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比は 0.3 としている。また、熱弾塑性解析において、鋼材のクリープ特性は文献7) に示されている以下の式で表現した。なお、クリープひずみは $400 \sim 600^\circ\text{C}$ の範囲で生じるとしている。

$$\epsilon_{cr} = A \times q^n \times t^m \quad (1)$$

ϵ_{cr} : 相当クリープひずみ速度 [%/min],

q : 相当偏差応力 [kgf/mm^2],

A : べき乗数 $= 2.8 \times e^{0.0667T} \times 10^{-20}$,

n : 応力次数 $= (808.3 - T) / 83.3$,

m : 時間時数 $= -0.65$, t : 時間 [min], T : 温度 [$^\circ\text{C}$]

試験体組立時の解析は基準温度を 20°C とし、デッキとトラフリップとデッキ-トラフリップ溶接線の要素のみの状態で溶接部に熱を与えた後、常温となるまで自然冷却

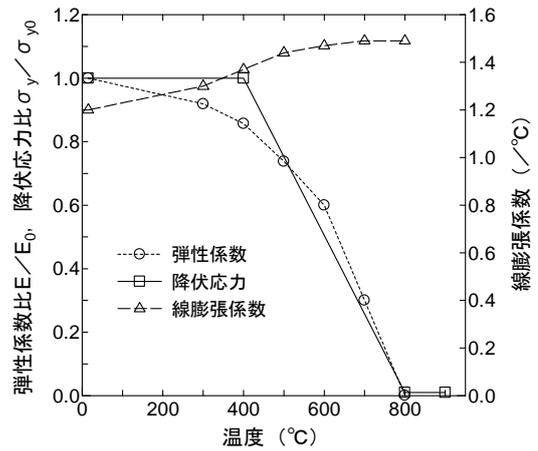


図-2 機械的性質

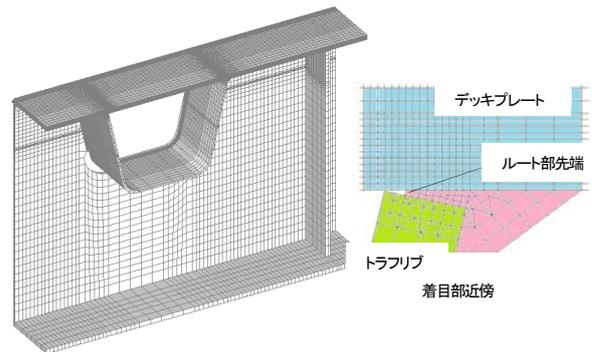


図-3 解析モデル

した。次に、ウェブと下フランジが接合された状態の横リブの要素とデッキ-横リブウェブ溶接線のモデルを先のモデルに結合して溶接部に熱を入れて、常温となるまで冷却した。最後に横リブウェブ-トラフリップ溶接線モデルを作成して熱を与えて、常温まで冷却した。溶接については便宜上、溶接の運棒等を考慮せず、表-2に示す溶接条件から算出した入熱量を溶接線の要素に体積熱流束として同時に与えた。なお、各溶接線の溶接脚長は文献5)の試験体の実測値を参考に 8mm で統一している。図-3に解析モデルを示す。解析モデルは試験体の対称性を考慮した1/4モデルであり、使用した要素はソリッド要素、着目するデッキ-トラフリップ溶接線の溶接ルート部近傍の要素サイズは $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ とした。なお、応力解析時は自重を考慮せず、定盤などもモデル化していないため、対称性の考慮に加え、鉛直方向の拘束が必要となる。鉛直方向の拘束は着目部の応力に及ぼす影響が小さいと考えられるため、デッキ上面の幅方向端部の1辺とした。

残留応力除去焼鈍の解析では溶接後の試験体に対し、基準温度を 20°C 、最高温度を 625°C とし、昇温、降温速度を共に 40°C/hr とした。

部分加熱の解析では、デッキ-トラフリップ溶接線直上のデッキ表面部を幅 28mm で加熱することとした(図-4)。加熱条件は、ヒータの温度については鋼材の性質に悪影響を及ぼさないように残留応力除去焼鈍の最高温度と同

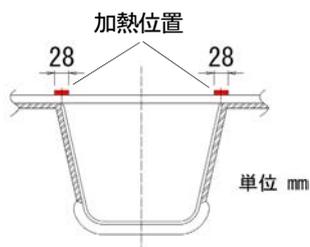


図-4 解析における加熱位置

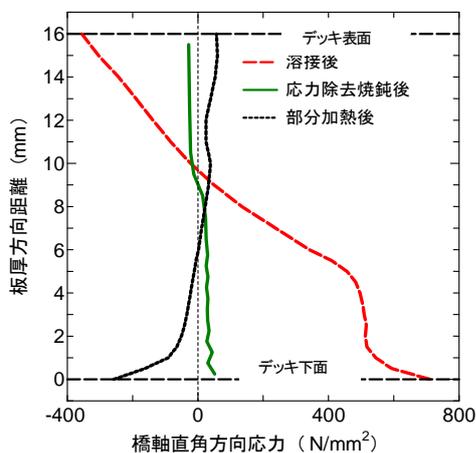


図-5 残留応力分布

じ 625℃とし、加熱時間と加熱部の要素表面の熱伝達率については溶接ルート部にクリープひずみが生じる温度まで上昇するように調整した結果、加熱時間を2時間とし、熱伝達率を大気中の10000倍としたところ、溶接ルート部の温度が550℃に達した。なお、冷却は自然冷却としている。

2.2 解析結果

図-5に溶接ルート部の先端からデッキの板厚方向に沿った橋軸直角方向の残留応力分布を示す。図中には溶接後と、残留応力除去焼鈍後、部分加熱後の結果を示している。溶接後の溶接ルート部の残留応力は著者らが推定していたとおり^{4,5)}、引張であり、766 N/mm²と大きな値が確認できる。なお、縦リブ支間部のデッキ-トラフリブ溶接線については溶接ルート部とデッキ表面が引張の残留応力となることが確認されているが¹⁾、交差部においてはデッキ表面に圧縮の残留応力が生じている。また、残留応力除去焼鈍後には残留応力が断面全体で低減され、溶接ルート部における値は51 N/mm²となっており、疲労試験にて疲労耐久性が大幅に向上したこと⁹⁾と対応している。

部分加熱を実施した場合は、溶接ルート部の残留応力が250 N/mm²と、引張から疲労に対して有利な圧縮となり、部分加熱による残留応力低減の可能性が認められる。

3. 部分加熱試験

部分加熱試験はまず、矩形鋼板を対象とした試験により残留応力低減の可能性を確認した後、鋼床版試験体の試験を実施した。

3.1 小型試験体を用いた検討

(1) 試験体

試験体は表-3中に示した供試鋼材から切出した長さ700mm、幅150mmの矩形鋼板である。試験体の形状と寸法を図-6に示す。試験体の表裏面の長手方向中央には面外ガセット溶接継手部に生じる引張残留応力を模擬するためにTIG-dressingを行っている¹²⁾。TIG-dressingは自動で行い、タングステン電極(2%Na合金)は3.2φ、電流は300A、速度は125mm/minとし、シールドガスには100%Ar(流量10l/min)を用いた。試験体はTIG-DressingのままのT1試験体と、TIG-Dressingを行った試験体に部分加熱を行ったH1,H2試験体の合計3体である。

(2) 部分加熱試験

部分加熱には図-7に示す直方体(254×305×51mm)のセラミックファイバーに発熱体を埋め込んだタイプのヒータ(750W, 1.6W/cm², 最高表面温度1093℃)を2台用いた。試験体は耐熱煉瓦上に設置し、試験体の上面から加熱した。小型試験体の加熱イメージを図-8に示す。加熱にあたっては試験体の表裏面に熱電対を設置し、温度履歴を計測するとともに温度調節器を用いてヒータ直下の試験体表面の温度を残留応力除去焼鈍⁹⁾よりやや安全側に、600℃以上とならないように制御した。加熱時間はすべての熱電対の温度がほぼ平衡状態になったと判断してから約3時間とし、その後は自然冷却した。H2試験体は断熱性を高めるために、厚さ12.5mmのシリカ繊維マット(SiO₂≥94%, Al₂O₃≥3.0%, 酸化ナトリウム≥0.3%, バインダー≤3%)でヒータも含めた試験体全体を覆った状態で加熱を行った。図-9に熱電対で計測した表裏面の温度履歴を示す。試験体下面の温度はH1試験体で462℃, H2試験体で520℃まで上昇した。加熱面の温度はヒータの機構上熱が逃げてしまうためか試験体下面よりも低く、いずれの試験体も600℃までは上昇しなかった。

表-3 供試鋼材の機械的性質と化学成分

部材	材質	板厚 (mm)	機械的性質			化学成分 %				
			降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び(%)	C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000
小型試験体	SM490	12	354	511	29	16	29	130	24	2
デッキプレート	SM490YA	16	405	517	26	16	20	110	9	4
トラフリブ		6	416	550	23	20	55	165	35	35
横リブ・補剛材		12	463	562	25	16	35	135	7	1

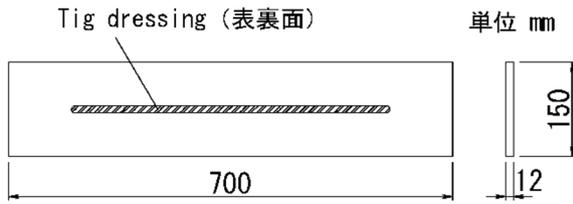


図-6 小型試験体

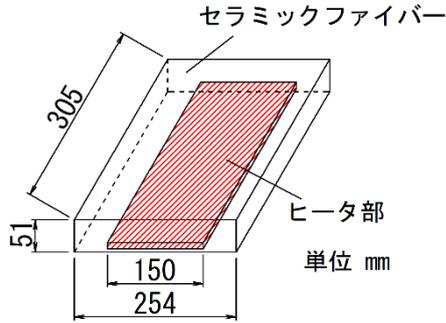


図-7 セラミックファイバーヒータ

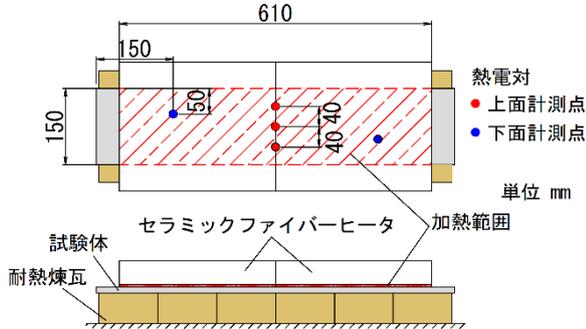


図-8 小型試験体の加熱状況

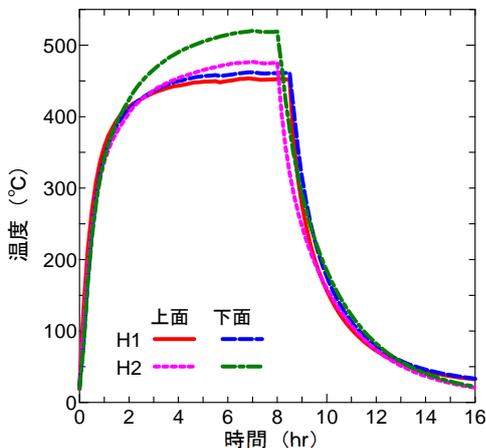


図-9 小型試験体の温度履歴

(3) 残留応力計測

残留応力計測は試験体長手方向中央断面の表裏面にひずみゲージを貼付し、切断法で計測した。ひずみゲージはゲージ長 1mm の 2 軸のひずみゲージで、ヤング率 $E=2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ として残留応力値を算出した。図-10 に残留応力計測結果を示す。残留応力計測には残留応力値の試験体表裏面の差は小さかったため、図中には表裏面の平均値を示している。部分加熱により、引張残留応力が大幅に低減され、その効果

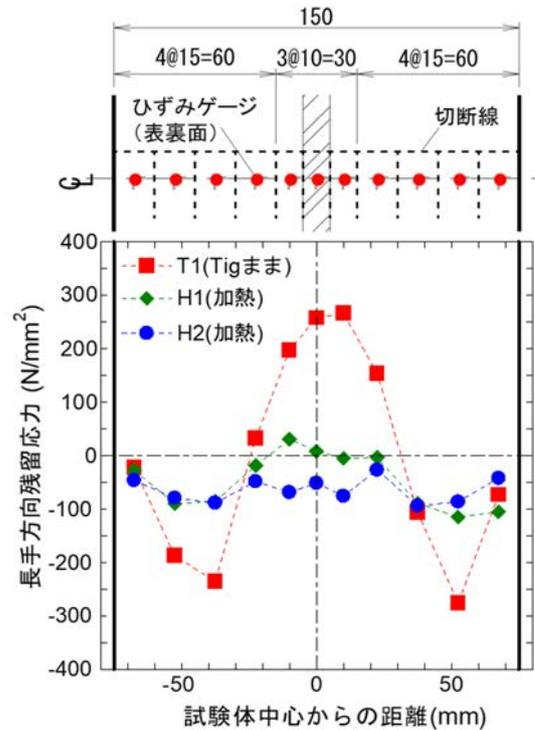


図-10 小型試験体の残留応力分布

は加熱時の最高温度が高い H2 で大きいことがわかる。

3.2 鋼床版試験体による試験

(1) 試験体

試験体の寸法は図-1 に示したとおりである。供試鋼材は表-3 中に示している。試験体の製作にあたっては、長さ 1350mm、幅 1750mm のデッキにトラフリップを 2 本接合し、溶接始末端部と組立て溶接部を避けて試験体 2 体分のデッキを切出し、横リブと補剛材を溶接接合した。デッキとトラフリップの溶接は、径 1.2mm のフラックス入りワイヤー (JIS Z3313 T 49J 0 T1-0 CA-U) を用いた CO_2 自動溶接とし、溶接溶込み量の目標をトラフリップ厚の 75%以上とした。具体には、トラフリップにルートフェース 1.5mm で 47.5 度の開先を施し、溶接角度を 52 度として下向きで 1 パスの溶接を行った。溶接条件は、電圧 35~36V、電流 250A、速度 340mm/min である。溶接は 1 溶接線毎に行っている。

(2) 部分加熱試験

鋼床版試験体では、前節に示したセラミックファイバーヒータを各溶接線上に 1 台ずつ、合計 4 台をデッキ上面に設置し、試験体全体をシリカ繊維マットで覆った状態で 24 時間加熱した。また、試験体中央断面の溶接線直上のデッキ上面とデッキ下面のトラフリップ内側の上端から 5mm 位置に熱電対を設置 (図-11) し、温度履歴を計測した。加熱試験の状況を図-12 に示す。なお、既製品のヒータを用いたため、2 章に示した事前解析と比較して加熱幅は広がっている。

図-13 に熱電対で計測された温度履歴を示す。対称位置となる外側の溶接線 AO と BO、中央側の溶接線 AI

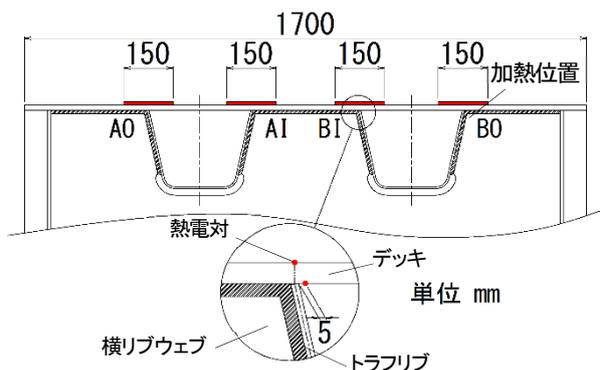


図-11 鋼床版試験体の熱電対設置位置

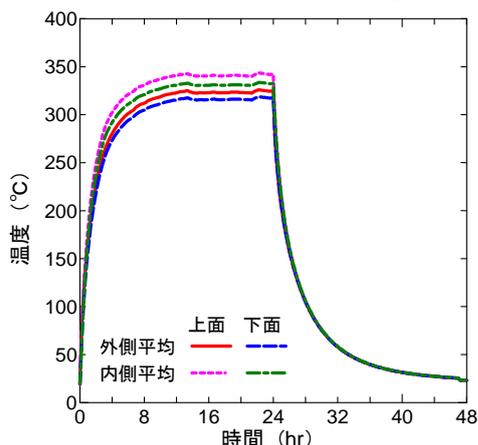


図-13 鋼床版試験体の温度履歴



図-12 鋼床版試験体の部分加熱状況

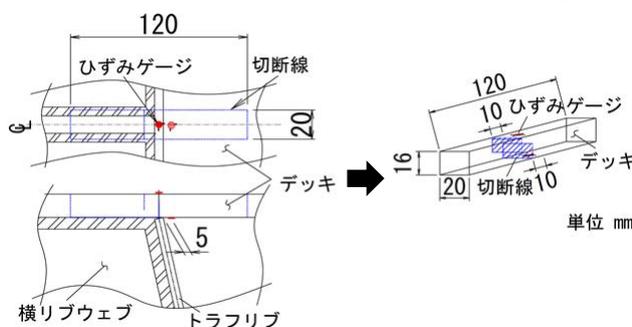


図-14 鋼床版試験体の残留応力計測

表-4 鋼床版試験体残留応力計測結果 (N/mm²)

試験体		溶接線							
		AO		AI		BI		BO	
		1軸	2軸	1軸	2軸	1軸	2軸	1軸	2軸
デッキ 上面	溶接のまま	-15.6	-30.1	-15.1	-29.8	-11.7	-26.2	-30.2	-37.0
	部分加熱	-16.2	-28.6	-15.1	-26.9	-13.2	-25.0	-16.2	-20.1
デッキ 下面	溶接のまま	16.7	-	22.7	38.0	36.9	55.2	36.9	-
	部分加熱	26.4	41.4	12.8	20.2	12.5	-	23.8	31.1

と BI の傾向はほぼ同じであったため、図中にはそれぞれの平均値を示している。前章で示した解析では、溶接ルート部の温度が 550°C まで上昇したが、本試験における最高温度は、デッキ上面では 343°C、デッキ下面は試験体中央側の溶接線で 333°C、外側の溶接線で 318°C であった。この理由としてヒータの性能不足が考えられる。本試験に用いたセラミックファイバーヒータは、電力密度を 60% 程度高めることも可能であるが、実際の鋼床版パネルに適用する場合には、保温方法も含めて検討が必要になると考えられる。

(3) 残留応力計測

鋼床版試験体の残留応力計測は溶接のままの試験体と部分加熱を行った各 1 体の試験体を対象とした。図-14 に残留応力計測時のひずみゲージ貼付位置と切断線を示す。溶接ルート部の残留応力を計測することは困難なため、ひずみゲージは温度計測を実施した箇所と同じ箇所に貼付した。切断法では各溶接線直上のデッキを橋軸方向に 20mm 程度、横断方向に 120mm 程度となるように試験片を切り出し、ひずみゲージ貼付位置から横断方向に 10mm 程度離れた位置に、板厚方向へ 10mm 程度の切込みを入れた。表-4 に各試験体の横断方向の残留応力の計測結果を示す。試験片切り出し時に一部のひずみゲージが破損したため、表中には横断方向のひずみから算出した場合と 2 軸のひずみから算出した場合の

残留応力を示している。当該箇所は溶接線が 3 線交差する複雑な応力場であるが、ここでの得られた結果をみると、溶接のままの試験体のデッキ上面においては、値は小さいものの前章の解析と同様に圧縮の残留応力が生じている。部分加熱の効果については、その有無でデッキ上面の圧縮残留応力は大きく変わらないことがわかる。また、デッキ下面では部分加熱により引張残留応力が小さくなるものが多い。

4. 疲労試験

3.2 節に示した鋼床版試験体と同様の試験体に同じ条件で部分加熱を施し、疲労試験を行った。疲労試験には動的能力 300kN の電気油圧サーボ式材料試験機を用いた。既往の研究^{3)・5)}と同様に支持条件は横リブの下フランジ全体を 12 本の高力ボルトによる架台への固定とし、荷重はトラフリブ内の直上にシングルタイヤ (載荷面積 200mm×200mm) が載荷される場合を想定した (図-1)。1 つのトラフリブに載荷される荷重は下限荷重が 5kN で荷重範囲は 50kN である。荷重の繰返し速度は 5Hz とし、1000 万回の載荷を行った。著者らはデッキ下面のトラフリブから 5mm 離れた位置に貼付した単軸のひずみゲージ (ゲージ長 3mm) により疲労き裂の発生・進展状況を推定できることを確認しており³⁾、本試験においても、

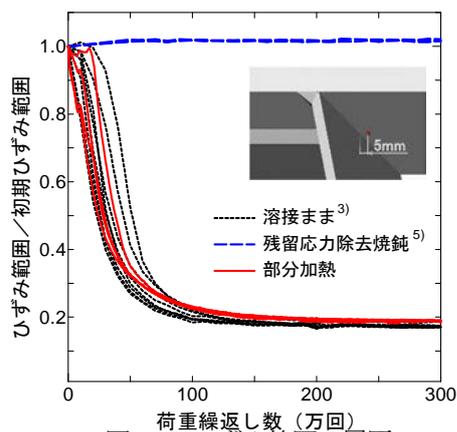


図-15 ひずみ範囲の履歴

荷重繰返し数 5000 回ごとにひずみ範囲の変化を測定した。ひずみのサンプリング速度は 500Hz である。

疲労試験では既往の研究³⁾と同様、デッキを貫通するき裂は確認されず、着目溶接線近傍を切り出し、液体窒素で冷却してハンマーによる打撃で破面を暴露すると、デッキ厚の 80% 程度まで進展したき裂が確認された。図-15 に着目する 4 溶接線におけるひずみ範囲と荷重繰返し数の関係を示す。図の縦軸のひずみ範囲は初期のひずみ範囲で除すことにより無次元化し、横軸の繰返し数はひずみがほぼ停留するまでの 300 万回までとしている。図中には同じ条件で実施した溶接のままの試験体³⁾と残留応力除去焼鈍した試験体⁵⁾の結果も示している。部分加熱した試験体の結果は溶接のままの試験体の結果とほぼ同じであり、前章では多少の引張残留応力の低減の可能性は確認されたものの、疲労き裂の発生・進展状況に影響を及ぼすものではないことが分かった。

5. まとめ

本研究では鋼床版の縦リブと横リブ交差部におけるデッキ-トラフリブ溶接線のデッキ進展き裂に着目し、鋼床版試験体モデルの熱弾塑性解析、小型試験体と鋼床版試験体のセラミックファイバーヒータを用いた部分加熱試験、部分加熱を施した鋼床版試験体の疲労試験を行った。本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 熱弾塑性解析により、縦リブと横リブ交差部のデッキ-トラフリブ溶接線の溶接ルート部には引張の残留応力が生じること、残留応力除去焼鈍による残留応力低減効果を確認した。さらに、加熱面が常に 625℃ となる理想的なヒータを用いた部分加熱により疲労耐久性が向上する可能性を確認した。
- (2) セラミックファイバーヒータを用いた部分加熱試験と切断法による残留応力計測により、小型試験体の残留応力低減を確認するとともに、鋼床版試験体の溶接ルート部において残留応力が低減している可能性を確認した。
- (3) セラミックファイバーヒータを用いた部分加熱を行った鋼床版試験体の疲労試験を実施したが、き裂の進

展性状は既往の部分加熱を実施していない試験体とほぼ同じであり、疲労耐久性向上効果を確認することはできなかった。

謝辞

本研究を実施するにあたり、法政大学デザイン工学部教育技術嘱託の田中義久氏、学生であった入野啓太氏、篠崎友希氏にご協力を頂いた。ここに記して深謝します。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼床版の疲労 2010 年改定版，丸善，2010.
- 2) 三木千寿，菅沼久忠，富澤雅幸，町田文孝：鋼床版箱桁橋のデッキプレート近傍に発生した疲労損傷の原因，土木学会論文集，No.780，I-70，pp.57-69，2005.
- 3) 原田英明，森猛，内田大介，川崎靖子：鋼床版デッキプレート・トラフリブ・横リブ交差部のデッキプレート貫通き裂の発生・進展性状に対するデッキプレート厚とスカラップの影響，鋼構造論文集，第 19 巻第 73 号，pp.65-74，2012.3.
- 4) 森猛，内田大介，川畑篤敬，山本一貴：鋼床版デッキプレート・トラフリブ・横リブ交差部のデッキプレートを進展する疲労き裂の進展性状に対する荷重範囲の影響，鋼構造論文集，第 21 巻第 82 号，pp.29-38，2014.6.
- 5) 森猛，山本一貴，内田大介，林暢彦：デッキプレート進展き裂を対象とした鋼床版疲労耐久性に対する残留応力除去焼鈍の効果，鋼構造論文集，第 22 巻第 85 号，pp.101-109，2015.3.
- 6) 豊貞雅宏，山口喜久次：線状加熱による溶接構造物の疲労強度向上対策の検討，日本造船学会論文集，第 176 号，pp.465-473，1994.
- 7) 廣畑幹人，伊藤義人：簡易熱源を用いた熱処理によるすみ肉まわし溶接継手の残留応力緩和に関する研究，土木学会論文集 A1，Vol.71，No.2，pp.208-220，2015.7.
- 8) 廣畑幹人，伊藤義人：トラフリブ溶接部の残留応力緩和に対する簡易熱源による熱処理の適用性検討，構造工学論文集，Vol.62A，pp.1168-1179，2016.3.
- 9) 佐藤邦夫，上田幸雄，藤本二男：溶接変形・残留応力，産報出版，1979.
- 10) 上田幸雄，松村由樹：TRC 試験及び RRC 試験の力学的特性と相関性，溶接学会論文集，第 2 巻第 1 号，pp.97-104，1984.
- 11) 井口進，貝沼重信，内田大介，城大樹：製作時のプレス矯正が鋼床版のデッキプレートと U リブ溶接部の応力性状に及ぼす影響，鋼構造論文集，第 19 巻第 73 号，pp.1-8，2012.3.
- 12) 森猛，内田大介：ボルト締めストップホール法で補修した面外ガセット溶接継手の疲労強度，鋼構造論文集，第 8 巻第 29 号，pp.15-26，2001.3.

(2020 年 7 月 17 日受付)