

6. 鋼床版のデッキプレートとUリブの溶接部における疲労挙動に関する研究

尾上 聡史

1. 目的 近年、鋼床版のデッキプレートとUリブの溶接ルート部の先端から疲労き裂が発生し、デッキを貫通する疲労損傷が報告されている。このき裂（以下、ルートき裂と呼ぶ。）がデッキを貫通すると路面が陥没し、車両の走行安全性が確保できなくなる恐れがある。そこで、本研究ではルートき裂の発生からデッキプレートの貫通に至るまでのメカニズムを解明することを目的とした。そのために、ルート部の溶接残留応力を切断法、磁歪法および熱弾塑性応力解析により明らかにした。また、独自に構築した試験システムを用いた疲労試験および有限要素応力解析を実施した。

2. 内容

2.1 溶接残留応力 溶接残留応力の検討には、後述する疲労試験に用いた試験体から切り出した試験体（以下、実構造試験体）および、この実構造試験体の諸寸法を3倍（デッキプレート厚：36mm，Uリブ厚：18mm，溶接サイズ：18mm（公称値））としたモデル試験体を用いた。モデル試験体の形状・寸法を図1に示す。

残留応力はこれらの試験体の表裏面に1軸ひずみゲージ（ゲージ長：0.3mm）を貼付し、このゲージ周辺を幅0.2mmの糸鋸で切断することで生じる切断前後のひずみの変化量から算出した。この切断法により得られた残留応力は、実構造試験体とモデル試験体で同じ傾向にあった。したがって、モデル試験体を用いることで、溶接残留応力を測定することが可能であると言える。また、ルートき裂の発生・進展経路の近傍における残留応力分布を明らかにするため、熱弾塑性有限要素応力解析を実施した。解析モデルの形状・寸法は、モデル試験体に基づき決定した。その要素分割例を図2に示す。要素には3節点および4節点の2次元平面ひずみ要素を用いた。その最小要素寸法は、切断法の測定結果と比較することに配慮して、0.6mm×0.6mmとした。また、ルートギャップが無いモデルについては、溶接未溶着線の上下に位置する要素の節点を2重節点とすることで未溶着部をモデル化した。残留応力解析では、まず、鋼材の弾性係数と降伏応力がほぼ0となる温度973Kに溶接金属部を瞬間的に加熱した状態を初期条件として熱伝導解析を行った。次に、熱伝導解析で得られた温度分布を熱荷重として与え、材料の機械的性質の温度依存性を考慮した熱弾塑性応力解析を行った。この解析を繰返し行うことで、十分な時間が経過してモデル全体が外気温度288Kに達した時点における応力性状を求めた。また、解析モデルは完全弾塑性体と仮定し、降伏応力にはvon-Misesの降伏条件を用いた。なお、溶接残留応力の数値解析には、汎用有限要素解析コードMarc 2001を用いた。試験体の溶接残留応力の解析結果を図3に示す。解析結果は測定結果の傾向を良く表している。

2.2 疲労試験 試験体はFEM応力解析の結果に基づき図4に示すような2本のUリブを有する鋼床版モデルとした。デッキ厚、Uリブ厚および溶接溶込み深さをパラメータとした6種類、計13体を製作した。以下では、これらの試験体を表1に示す試験体名で呼ぶ。疲労試験時の応力は、疲労荷重直下のUリブの支間中央部における、デッキとUリブの溶接止端からUリブ外側に5mm離れた位置のデッキ下面の橋軸直角方向応力で照査した。この応力照査位置において、実橋における動的計測から得られた応力条件（引張応力 20 N/mm²，圧縮応力-160 N/mm²，応力範囲 180 N/mm²）を基準とした、ダブルタイヤ疲労試験

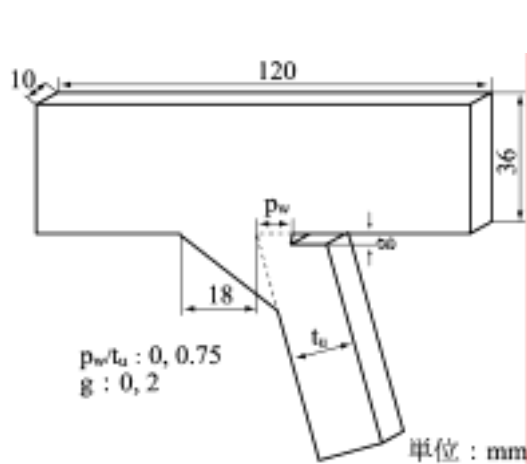


図1 モデル試験体の形状・寸法

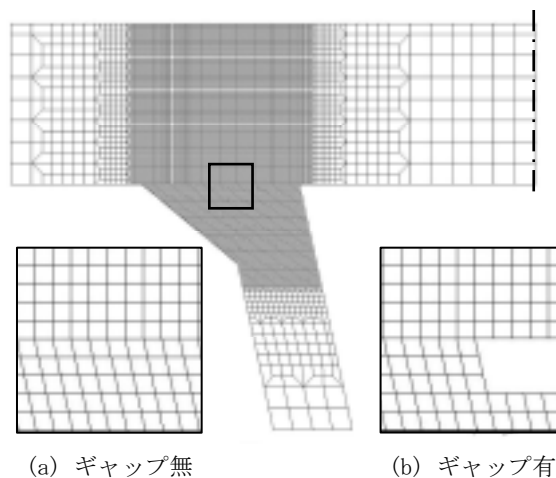


図2 解析モデルの要素分割例

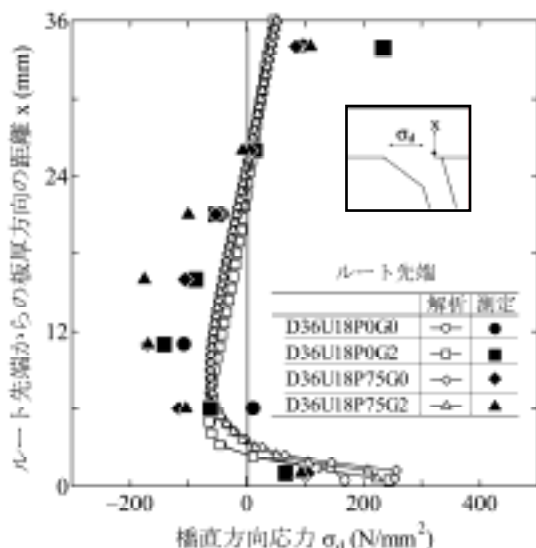


図3 解析結果および切断法による測定結果

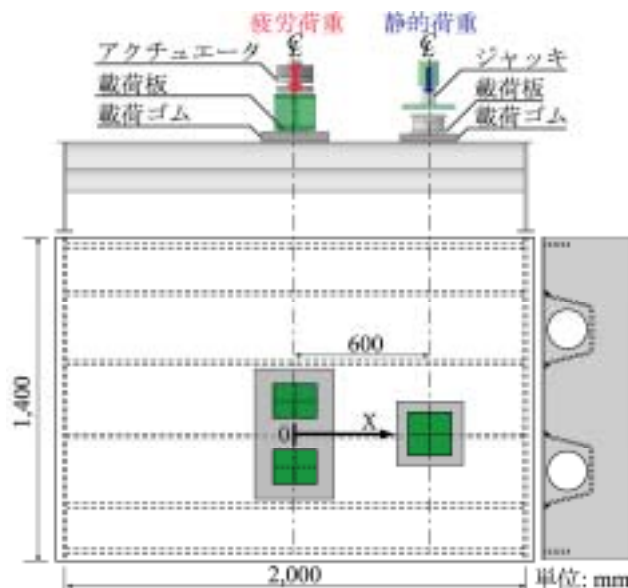


図4 試験体およびダブルタイヤ疲労試験システム

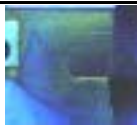

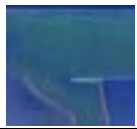



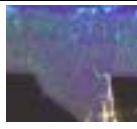

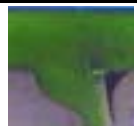

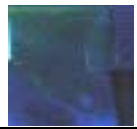





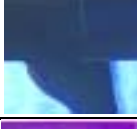







を実施した。また、シングルタイヤによる荷重を模して、載荷板1枚をUリブ間の中央に設置することによる疲労試験も実施した。なお、この試験では疲労荷重のみを荷重した。

疲労試験の条件および疲労試験結果を表1に示す。基準の応力条件で実施した疲労試験では、全ての試験体 (No.1, 5, 7) からルートき裂が発生した。したがって、基準の応力条件であれば溶接条件やUリブ厚によらず、ルートき裂が発生すると考えられる。応力範囲を 120 N/mm^2 (基準の条件の2/3) とした疲労試験では、No.6 および No.12 でき裂が発生したが、No.2 では発生しなかった。また、応力範囲を基準の1/2に減少したNo.3においてもルートき裂は発生しなかった。したがって、ルートき裂の発生には、 120 N/mm^2 程度の応力範囲が必要であると考えられる。また、応力範囲が等しい場合、引張応力が 40 N/mm^2 以上のNo.4 および No.12 は、 20 N/mm^2 のNo.1 および No.6 に比べて、き裂進展が70%以上長かった。このことから、引張応力が大きいほどルートき裂は進展しやすと考えられる。一方、圧縮応力のみを作用させたNo.8 および No.9 では、ルートき裂は発生しなかったことから引張応力が作用しなければき裂は発生しないと考えられる。また、No.5 ではダブルタイヤの疲労試験後にシングルタイヤの疲労試験を実施した。ルートき裂の断面は、他の試験体では進展に伴いき裂進展の角度が徐々に大きくなっていくのとは異なり、発生後に進展角度が減少した後に大きくなっていることが確認できた。また、角度の変化も急激であり、ダブルタイヤからシングルタイヤに作用応力が変化したためにき裂進展角度が変化したと考えられる。

2.3 有限要素応力解析 ルートき裂の発生・進展に伴い、き裂先端の応力性状は変化していくと考えられる。そこで、鋼床版試験体を模した解析モデルに仮想ルートき裂を導入することで、その影響を検討することとした。ダブルタイヤを荷重した解析モデルの要素分割例を図5に示す。解析対象は疲労試験の試験体、載荷ゴムおよび載荷板とした。また、解析モデルの載荷板および載荷ゴムの寸法・形状および配置は、疲労試験に基づき決定した。要素には8節点ソリッド要素を用い、その最小寸法は着目する断面のルート先端で $0.2 \times 0.2 \times 2 \text{ mm}$ とした。載荷ゴムは弾性係数 20 N/mm^2 、ポアソン比 0.49 の線形弾性体とした。溶接未溶着部および仮想き裂は、2重節点と接触要素を用いることでモデル化した。仮想き裂のデッキ厚方向の長さは $0.2, 2, 4, 6, 8 \text{ mm}$ の5種類とした。また、き裂の導入範囲についてはき裂端部の影響を受けないようにするため、導入する仮想き裂の最大長さ 8 mm の10倍として、スパン中央の疲労荷重載荷点直下から $\pm 40 \text{ mm}$ 、総長 80 mm とした。仮想き裂を導入する角度については、疲労試験時に発生したルートき裂を考慮し、デッキプレート下面に対して 70° とした。要素の大きさによる応力集中の変化の影響を抑えるため、ルート先端近傍の要素寸法は、全て $0.2 \times 0.2 \times 2 \text{ mm}$ とした。ダブルタイヤモデルの載荷荷重は、疲労試験の荷重から、疲労荷重の最大を 135 kN 、最小を 13.5 kN 、静的荷重を 160 kN とした。以下では、荷重条件 Min を疲労荷重 13.5 kN 、静的荷重 160 kN とする。また、荷重条件 Max を疲労荷重 135 kN 、静的荷重 160 kN とする。一方、シングルタイヤモデルの荷重は疲労荷重の最大を 60 kN とした。

ダブルタイヤモデルのき裂未導入時における、橋軸方向スパン中央のルート部近傍のコンター図を図6に示す。最大荷重載荷時には溶接未溶着部が閉口しており、最小荷重載荷時には開口している。したがって、疲労試験時に溶接未溶着部は開閉口を繰り返していると考えられる。

表-1 試験体，疲労試験条件および疲労試験結果

試験体	No.	着目部の設定応力			载荷回数	発生き裂			
		σ_{max}	σ_{min}	$\Delta\sigma$		MT 写真	模式図	き裂長さ (mm)	
		(N/mm ²)			(万回)				
D12U6	SP0	1	-160	20	180	300			3.2
		2	-100	20	120	450			
		3	-70	20	90	300			
	SP75	5	-160	20	180	300			1.5
			-40	-4	36				
			-60	-6	54				
6	-100	20	120	300			2.7		
D12U8	SP50	7	-160	20	180	300			3.8
		8	-180	-10	170	450			
		9	-180	-10	170	300			2.4 (止端き裂)
	SP50P	10	-160	20	180	300			1.2
	MP50	11	-160	20	180	460			4.5 (止端き裂)
-185			23	208	150				
D14U6	SP75	12	-78	46	124	300			6.4
		13	0	46	46	300			0.7

※ 試験体の名称 D：デッキプレート厚，U：Uリブ厚，SP：半自動CO₂溶接，MP：手溶接，P：プレス成形

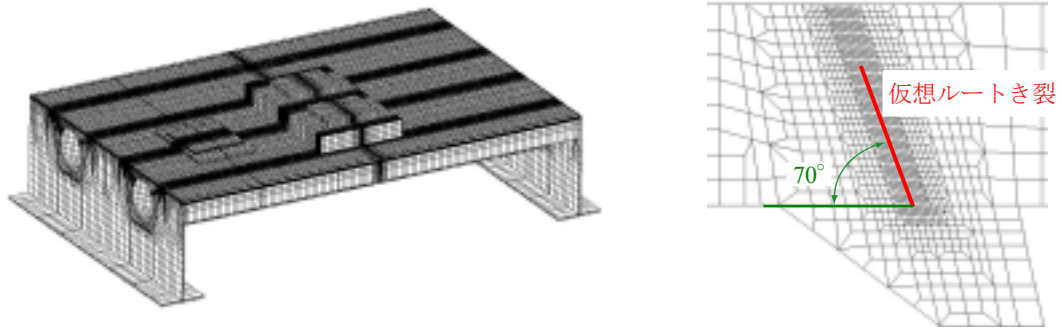


図5 ダブルタイヤモデルの要素分割例および仮想き裂導入図

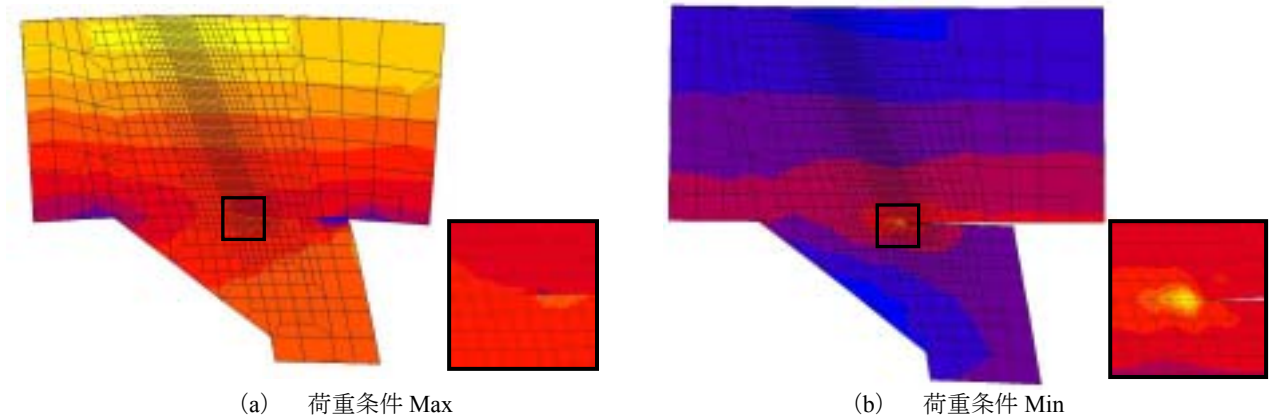


図6 ルート部近傍のコンター図 (応答倍率: 50倍)

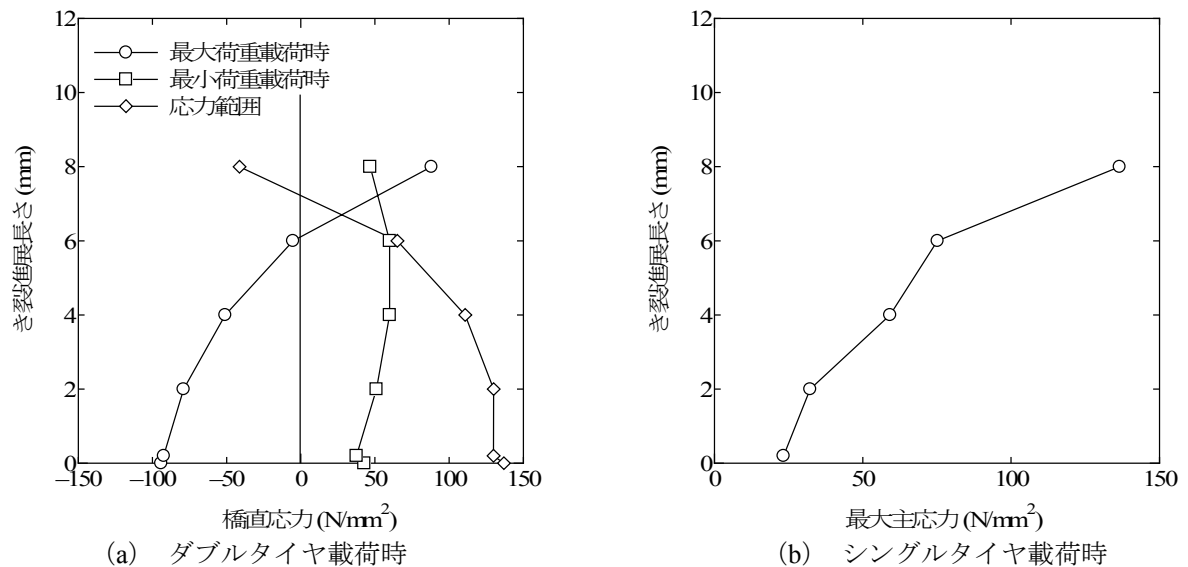


図7 き裂導入解析結果

き裂導入モデルの解析結果を図7に示す。ダブルタイヤモデルでは、き裂の進展長さが4mm以上になると応力範囲が著しく低下している。一方、シングルタイヤモデルでは、き裂の進展に伴い引張応力が増加していた。これは、ルートき裂の発生起点を支点とした梘子反力が作用しているためである。

3. 結論 本研究では、ルート部に存在する溶接残留応力を明らかにするために、切断法と磁歪法による測定、および熱弾塑性応力解析を実施した。また、疲労き裂の発生メカニズムを明らかにするために、疲労試験および有限要素応力解析を実施した。主な結果を以下に示す。1) ルート部先端近傍には高い引張溶接残留応力が存在している。2) ルートき裂の発生要因は、ルート部に作用する正負交番応力による溶接未溶着部の開閉口である。また、このき裂はルート部の応力範囲が180N/mm²であれば、試験体の諸寸法によらず発生する。3) ルートき裂の進展要因は、シングルタイヤ載荷時に発生するき裂先端の引張応力である。この引張応力がき裂の進展に伴い増加することで、き裂が貫通に至ると考えられる。