

11. 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基礎的研究

三浦 健一

1. 目的 鋼床版においてデッキプレートとUリブの溶接ルート部から疲労き裂が発生し、デッキプレート表面に向かって進展する疲労損傷が報告されている。このき裂（以下では、このき裂をルートき裂と呼ぶ）がデッキプレートを貫通すると路面が陥没し、車両の走行安全性を確保できなくなる。そこで、本研究ではルートき裂の発生要因と進展性状を明らかにすることを目的とした。そのために、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により、ルートき裂の発生要因を検討した。また、Uリブ厚、溶接溶込み深さおよび溶接方法（半自動溶接、手溶接）がルートき裂の進展性状に及ぼす影響を検討した。

2. 内容

2.1 疲労試験方法 試験体はFEM解析の結果に基づき、図-1に示すように2本のUリブを有する鋼床版モデルとした。Uリブ厚、溶接溶込み深さおよび溶接方法を変化させた3種類、計5体の試験体を製作した。以下では、これらの試験体を表-1に示すように、それぞれD12U6SP0-FS1、D12U6SP0-FS2、D12U8SP50-FS、D12U8SP50-F、D12U8MP50-FSと呼ぶ。

実橋を走行する車両の輪荷重は、アスファルト舗装により分散された後にデッキプレートに伝達される。そこで本システムでは静的载荷試験およびFEM解析の結果に基づき、図-1に示すように疲労荷重側の载荷板とデッキプレート上面の間に载荷ゴム（G12、80mm）を挿入することで十分に荷重を分散させることに配慮した。また、図-2に示すデッキプレートとUリブの交差部における溶接止端近傍の実働応力波形は、輪荷重の移動により図-2(a)に示すように引張応力と圧縮応力が交番して発生している。この交番応力は、デッキプレートとUリブの交差部における溶接ルート部においても生じることをFEM解析結果により明らかにしている。この溶接ルート部に発生する応力の交番により、溶接未溶着部が開閉口することでルートき裂が発生すると推測された。そこで、本システムは、図-1に示すようにアクチュエータによる疲労荷重とジャッキによる静的荷重を組み合わせることで、図-2(a)の実働応力波形を模擬して図-2(b)に示すような正弦波で応力の交番を再現した。

2.2 疲労試験結果 疲労試験時の試験条件および試験結果を表-1に示す。D12U6SP0-FS1、D12U6SP0-FS2およびD12U8SP50-FSの3体の試験体ではルートき裂が発生した。いずれの試験体においてもルートき裂の発生領域は、疲労荷重の载荷点直下から橋軸方向に50~150mmの範囲であった。また、D12U8SP50-FではデッキプレートとUリブの交差部における溶接ルート近傍に引張応力を導入しない作用応力下で検討するために、疲労荷重のみを载荷して疲労試験を実施した。その結果、疲労き裂は発生しなかった。以上から、ルートき裂はデッキプレートとUリブの交差部におけるデッキプレート側の溶接ルート近傍に作用する引張応力によって発生すると言える。ルートき裂が発生した3体の試験体の内、D12U6SP0-FS1とD12U6SP0-FS2では、 300×10^4 回載荷しており、そのき裂長さは最大でそれぞれ3.2mm、5.7mmであった。一方、D12U8SP50-FSでは繰返し回数を 1000×10^4 回まで増加させた。そのき裂長さは最長で3.8mmであり、前述の2体のき裂長さと同程度であった。したがって、ルートき裂は進展後にデッキプレートを貫通せずに、停留している可能

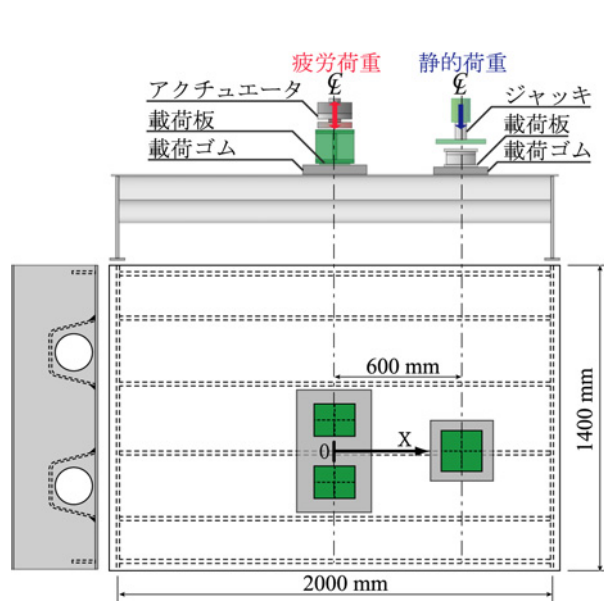


図-1 試験体の形状・寸法および疲労試験システム

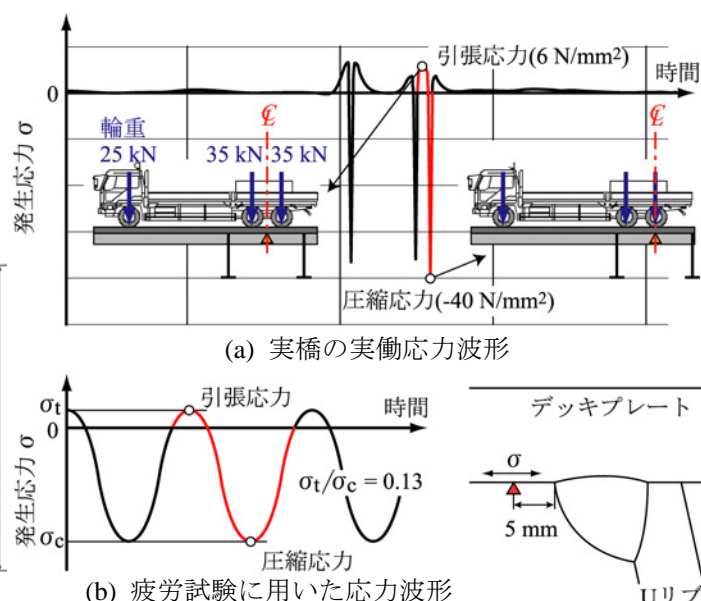


図-2 応力波形

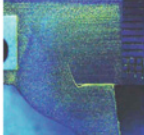

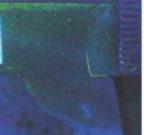



11. A Study for Fatigue Behavior of Welded Joints Connecting Between the Deck Plate and the U rib in the Orthotropic Steel Deck

Kenichi MIURA

Fatigue damages are reported to the orthotropic steel deck under the traffic situation that there is much passing of a large-size car and the rate of a fault-loading vehicle is large. Recently, also in it, the crack initiated in the direction of the deck plate surface from the welding part between U rib and a deck plate is discovered. Since it has initiated from the inside of U rib, such a crack is difficult to discover. And since pavement caves in when this crack progresses, it becomes impossible moreover, to secure the run safety of vehicles.

In this study, it aimed to clarify the generation factor and the progress properties of this root crack. The propagation of this crack was simulated for that by fatigue testing which used the examination system that originally constructed it. This fatigue examination system can reproduce the stress wave type in an actual orthotropic steel deck bridge by combination a static load with the fatigue load. Moreover, this system can be the simulation of the decentralization of the load by placing thick rubber between the upper surface of the deck plate and the U rib. In addition, to understand the stress properties of the weld root part between the deck plate and U rib was considered to fatigue examination results, the finite element stress analysis was carried out. Moreover, the effect that the thickness of the deck plate and the U rib, the weld penetration depth and the welding method as parameter in specimens and analysis models of the orthotropic steel deck exerted on the progress of the root crack was explored.

表-1 試験条件および試験結果

試験体*	D12U6SP0-FS1	D12U6SP0-FS2	D12U8SP50-FS		D12U8SP50-F	D12U8MP50-FS
発生き裂の発生起点と進展状況	 ルートき裂 6 mm	 6 mm	 4 mm	 止端き裂 4 mm	 き裂未発生 4 mm	 デッキプレート 貫通き裂 止端き裂 4 mm 溶接ビード 手溶接 8 mm 方向
き裂長さ** a (mm)	3.2	5.7	3.8	止端 : 2.5 ルート : 0.8	なし	止端 : 4.4 デッキプレート : 12 ビード : 0.8
断面の位置 x(mm)	150	-100	150	-50	0	-50
応力 (N/mm ²)	引張応力 σ_t	20	40	20	0	23
	圧縮応力 σ_c	160	140	160	180	185
繰返し回数 N ($\times 10^4$ 回)	300	300	1000		300	190

* D:デッキプレート厚(mm), U:Uリブ厚(mm), S:半自動CO₂溶接, M:手溶接, P:Uリブ厚に対する溶接溶込み深さ(%), F:疲労荷重, S:静的荷重

** a:デッキプレート厚方向への投影長さ(mm)

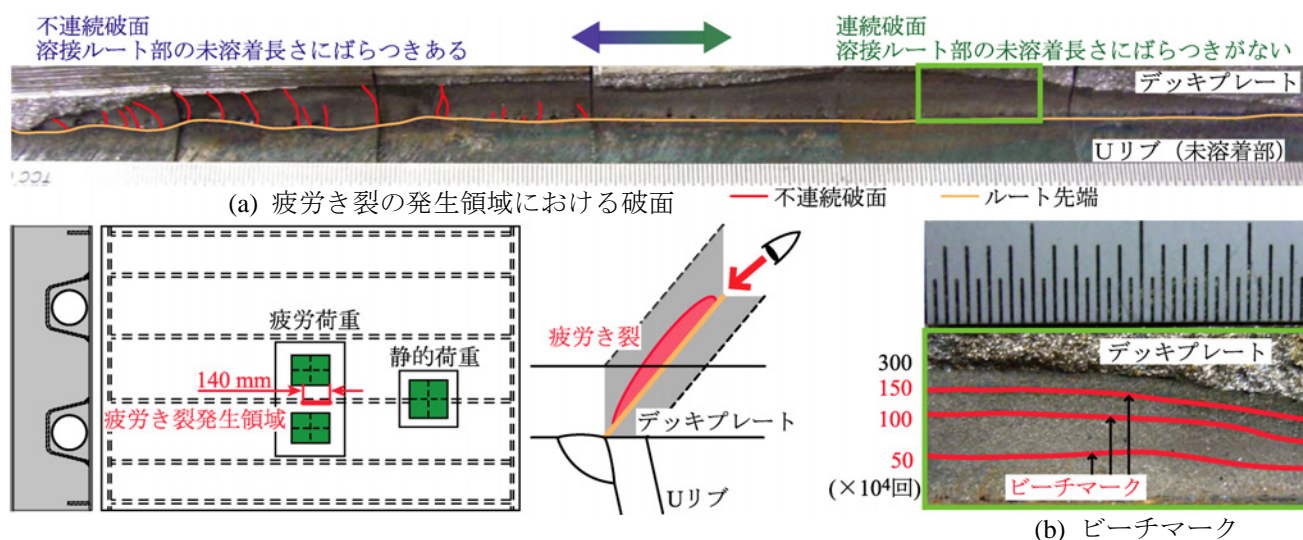


図-3 疲労き裂破面 (D12U6SP0-FS2)

性が考えられる。D12U8SP50-FS においてはルートき裂に加え、止端からも疲労き裂も発生した。この止端き裂が発生した領域におけるルートき裂長さは0.5~0.8mmであった。これはルートき裂のみ発生した領域のき裂長さと比較して短くなっている。したがって、止端き裂が発生した場合、ルートき裂は進展しにくいと考えられる。

ルートき裂の破面は、図-3(a)に示すように部分的に不連続であった。また、不連続破面となっている領域の未溶着長さは最大で1.5mm程度のばらつきがあった。以上から、未溶着長さのばらつきが大きい場合、橋軸直角方向の複数箇所からルートき裂が発生し、不連続な破面を形成すると考えられる。未溶着長さのばらつきが0.5mm程度の小さな領域において複数箇所から発生したルートき裂は、進展に伴い合体した。一方、未溶着長さのばらつきが大きな領域では、発生したルートき裂は合体せずに単独で進展した。D12U6SP0-FS2におけるビーチマーク試験結果を図-3(b)に示す。ビーチマーク試験は繰返し回数50, 100, 150 $\times 10^4$ 回の計3回行った。各ビーチマークの間隔は、疲労荷重の繰返し回数が増加するにしたがって小さくなっていることから、ルートき裂の進展速度はき裂進展に伴い減少し、停留したと考えられる。

D12U8MP50-FSでは、静的荷重および疲労荷重をともに増加することで正負交番応力の応力範囲を約15%増加した疲労試験を行った。その結果、この試験体ではルートき裂は発生せず、表-1に示すような3種類のき裂が発生した。それらのき裂の中で、デッキプレート表面から発生したき裂は190 $\times 10^4$ 回の載荷で貫通に至った。このき裂は疲労荷重を増加したため、Uリブウェブ直上のデッキプレート表面が降伏応力に達したことにより発生した。また、ルート部から発生したき裂は、溶接ビード方向へ0.5mm進展し、停留した。

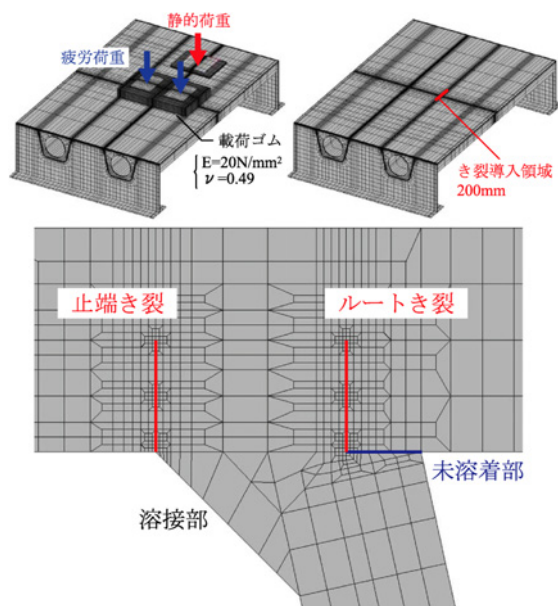


図-4 解析モデルの要素分割例

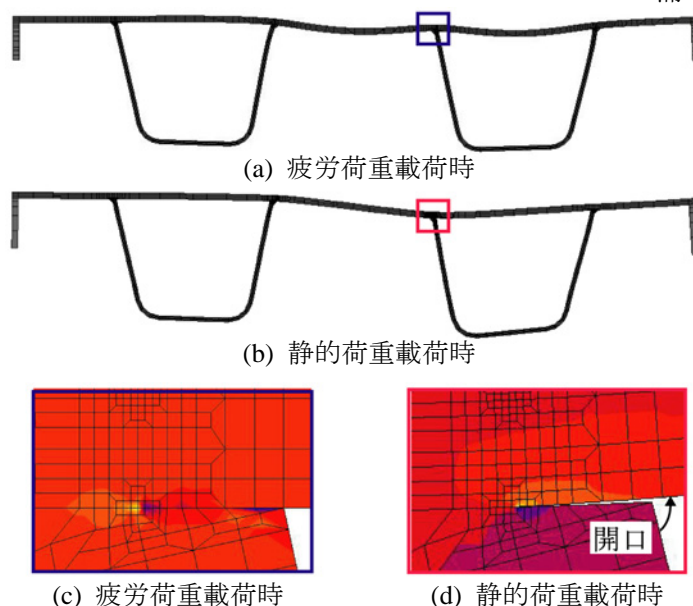


図-5 疲労荷重載荷断面の変形図およびコンター図 (x=0 断面)

2.3 有限要素応力解析 解析モデルの要素分割例を図-4に示す。解析モデルは試験体、載荷ゴムおよび載荷板を対象とした。要素には8接点ソリッド要素を用いており、最小要素寸法は、デッキプレートとUリブの交差部の溶接ルート先端および溶接止端近傍で $0.2 \times 0.2 \times 0.2 \text{mm}$ である。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。拘束条件としては、横リブ下フランジの下面を完全剛結とした。疲労荷重および静的荷重の大きさは、疲労試験時の荷重に基づいて決定した。試験体モデルの寸法・形状は、疲労試験時に使用した試験体に基づいて決定しており、デッキプレート厚および溶接溶込み深さをパラメータとして、それぞれがルートき裂の発生要因および進展性状に及ぼす影響を検討した。なお、デッキプレート厚は $12, 14, 16, 18, 20 \text{mm}$ の計5種類、Uリブ厚に対する溶接溶込み深さは $0, 25, 50, 75\%$ の計4種類とした。また、ルートき裂が発生した場合、き裂の進展に伴うき裂先端の応力性状の変化を把握するため、ルート部にき裂を導入したモデルで有限要素応力解析を行った。き裂の導入領域は疲労試験結果に基づき、疲労荷重載荷点直下から静的荷重側に 150mm 、反対側に 50mm 、計 200mm とした。導入したき裂長さはデッキプレート板厚方向への投影長さとしており、 $0, 0.4, 3, 6, 9 \text{mm}$ の5段階で検討した。

2.4 解析結果 解析結果はD12U6SP0-FS1を対象とした解析モデルで実施したものを示す。疲労荷重載荷断面におけるデッキプレートとUリブの交差部でのデッキプレートの変形は、疲労荷重載荷時では、図-5(a)に示すよう、正曲げとなっている。一方、静的荷重載荷時では、図-5(b)に示すように、静的荷重によりUリブが下方方向に押し下げられることで負曲げとなっている。そのために、溶接未溶着部が開口することでルート先端では橋軸直角方向に引張応力が発生していると考えられる。

デッキプレートとUリブの交差部における溶接止端から 5mm 位置および溶接ルート先端の橋軸直角方向応力を図-6に示す。疲労荷重載荷点直下における溶接ルート先端の橋軸直角方向応力は、溶接止端から 5mm 位置と比較して、圧縮応力は 28% 小さくなり、引張応力は 30% 大きくなっている。また、ルート先端の引張応力は、疲労荷重載荷点から静的荷重側に 120mm の位置で最大となっており、ルートき裂の発生および進展に対して最も厳しい応力状態であると考えられる。D12U6SP0-FS1での疲労試験結果でも、ルートき裂は疲労荷重載荷点から静的荷重側に 150mm の位置で最も進展しており、解析結果が示す傾向と良く一致している。

ルートき裂進展に伴うルートき裂先端の応力性状の変化を図-7に示す。ルートき裂長さが $0 \sim 6 \text{mm}$ の範囲では、ルートき裂の進展に伴い、そのき裂先端に発生する引張応力は増加する傾向を示している。しかし、ルートき裂長さが $6 \sim 9 \text{mm}$ では、き裂先端に発生する引張応力は減少する傾向となっており、ルートき裂長さ 6mm を境にルートき裂先端の応力性状が変化している。この結果より、ルートき裂先端に発生する引張応力は、ルートき裂がある程度進展したところで減少する傾向を示すため、進展速度は減少すると考えられる。

これまでルートき裂の発生要因として、疲労荷重直下のUリブウェブを起点としたデッキプレートの局所的な面外曲げが着目されてきた。そのため、ルートき裂の発生の予防や補修補強の対策として、デッキプレートを増厚することで曲げ剛性を大きくすることが考えられる。しかし、ルートき裂の発生要因は、疲労試験結果より、輪荷重の移動によってデッキプレートとUリブの交差部における溶接ルート部に引張応力が発生することで、未溶着部が開口するためであることが明らかになっている。そこで、有限要素応力解析によりデッキプレート厚の変化がルート先端の橋軸直角方向応力に及ぼす影響を検討した。その解析結果を図-8(a)

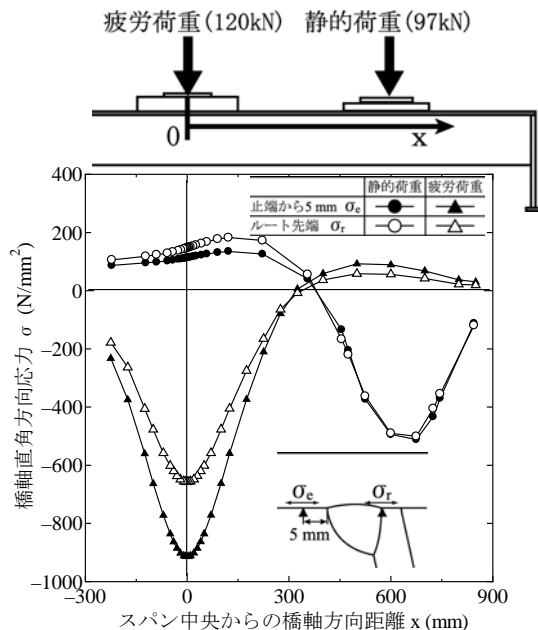


図-6 溶接止端から 5mm 位置とルート先端的応力性状

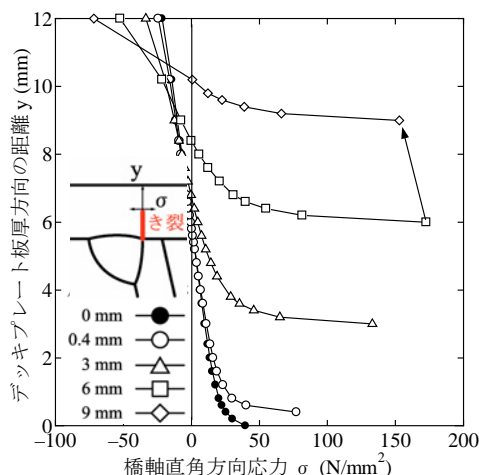
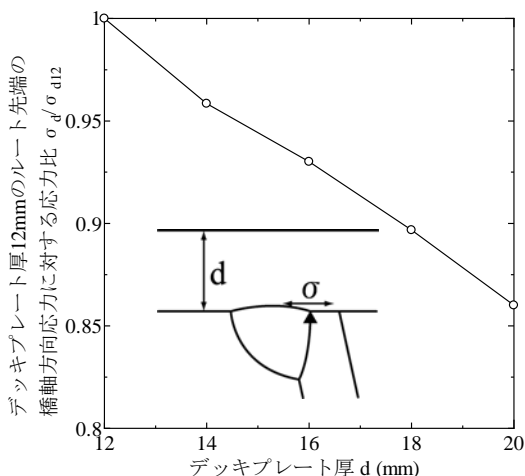
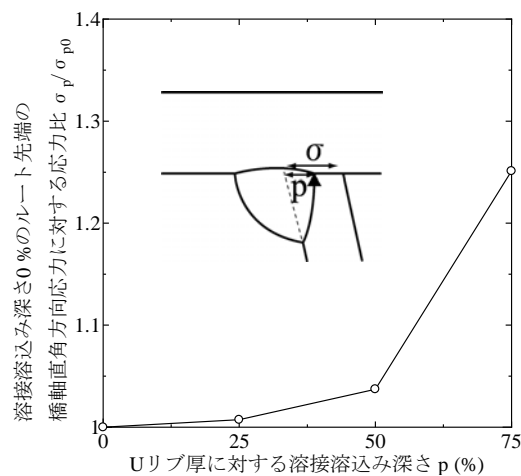


図-7 ルートき裂先端的応力性状



(a) デッキプレート厚



(b) 溶接溶込み深さ

図-8 パラメーターの変化がルート先端的橋軸直角方向応力に及ぼす影響

に示す。デッキプレートの増厚にともない、デッキプレートとUリブの交差部における溶接ルート先端的引張応力は線形的に減少する傾向を示している。しかし、その減少率は 12mm から 20mm で 15%程度であり、デッキプレートの増厚は、ルートき裂の発生や補修補強の対策としては効果的であるとは言い難い。また、Uリブ厚に対する溶接溶込み深さの変化がルート先端的橋軸直角方向応力に及ぼす影響を図-8(b)に示す。溶接溶込み深さの増加にしたがい、デッキプレートとUリブの交差部における溶接ルート先端に発生する引張応力は増加する傾向を示している。溶接溶込み深さが 0~50%での溶接ルート先端的引張応力の増加率は 1~5%程度であるのと比較して、溶接溶込み深さが 50~75%での増加率は 22%と大きくなっている。疲労試験を行った試験体の Uリブ厚に対する溶接溶込み深さは 0%もしくは 50%であり、どちらの溶接溶込み深さの試験体からもルートき裂が確認された。以上の結果から、Uリブ厚に対する溶接溶込み深さを 75%とした試験体からもルートき裂の発生するものと考えられる。

3. 結論 本研究では独自に構築した疲労試験システムにより、載荷荷重の分散効果と車両走行に伴う動的応力波形の交番を模擬した疲労試験を行った。また、疲労試験に用いた試験体を対象とした解析モデルにより、有限要素応力解析を行った。その結果を以下に示す。1)ルートき裂の発生要因は、輪荷重の移動によってデッキプレートとUリブの交差部における溶接ルート部に引張応力が発生することで、生じる未溶着部の開口である。2)デッキプレートとUリブの溶接部の未溶着長さにはばらつきがある場合、ルートき裂は複数箇所から発生し、不連続な破面を形成する。3)ダブルタイヤの輪荷重がデッキプレートとUリブの溶接線上を跨ぐ位置で繰返し作用した場合、ルートき裂の進展速度はき裂進展に伴い減少して停留する。4)デッキプレートの増厚および溶接溶込み深さの変更は、ルートき裂の発生や補修補強の対策としては効果的ではない。