鋼床版のUリブと横リブ交差部の疲労き裂に対する応急対策後の周辺部位の疲労リスク評価

中本勇[1]・平野正大[2]・福辻菜絵[2]

[1] (一財) 阪神高速先進技術研究所調査研究部橋梁・構造研究室
[2] 管理本部管理企画部保全技術課

要約

阪神高速では，U リブを有する鋼床版において，U リブと横リブ交差部の疲労き裂(タイプ④)が多く報告されており，タイプ④き裂に対してストップホールを設ける応急処置を実施している．き裂の進展に対するストップホールの効果は確認されているものの，周辺の溶接部への影響は明らかではない．本検討は，実橋での最大級のき裂とストップホールを模擬した FEA を実施し，応力性状および変形から影響の分析を行うことで，応急対策後の周辺部位の疲労リスク評価を行った．その結果，き裂が発生した場合に，着目溶接部に対してねじれの位置となる載荷条件において，スリット部の U リブ側止端溶接部では応力の増分が大きかった．その他の載荷条件では，応力の増分は小さく，疲労リスクは小さかった．

キーワード: 鋼床版，疲労き裂，ストップホール，応力集中

1．はじめに

阪神高速では，U リブを有する鋼床版において**図-1** に示す U リブと横リブ交差部の疲労き裂 (タイプ④) が多く報告されている．このき裂の主な発生原因は，U リブ直上の輪荷重載荷に伴う横リブの面内変形に起因する応力集中[1)]，輪荷重の U リブへの偏心載荷に伴う U リブのねじれ変形を横リブが拘束することで生じる応力集中[2)]などが考えられている．また，横リブ交差部の近くに形状保持のための密閉ダイアフラムを有する場合，これによって剛性が上がり，横リブスリット部の局部応力が大きくなることから，損傷数が多くなる傾向がある[3)]．

これに対し，既設鋼床版疲労対策マニュアル【付録】阪神高速の鋼床版疲労き裂応急処置施工要領[4)]では，き裂先端にストップホールを設ける応急処置が標準とされている．また，阪神高速の既設鋼床版疲労対策マニュアル[5)]では，き裂に対する応急処置の実施後に，恒久対策としてき裂発生部に当て板を施工することが規定されているが，実施工では応急処置の実施後に恒久対策を実施するまで期間が開く場合がある．

阪神高速の資産情報をもとに，応急処置による対策前後のき裂長を整理した結果を**図-3** に示す．対策前後の点検時のき裂長の関係より，±20 mm 計測誤差と仮定すると，応急処置後にき裂は進展していないと考えられ，ストップホールが応急処置としての効果があることが確認できる．

以上のように，ストップホールによるき裂の進展

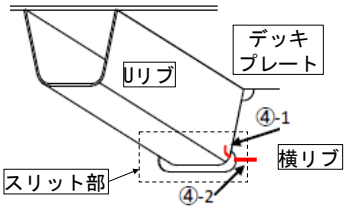
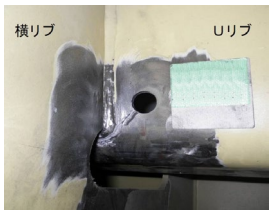


図-1 タイプ④き裂



(a) タイプ④-1

(b) タイプ④-2

図-2 タイプ④き裂に対する応急処置

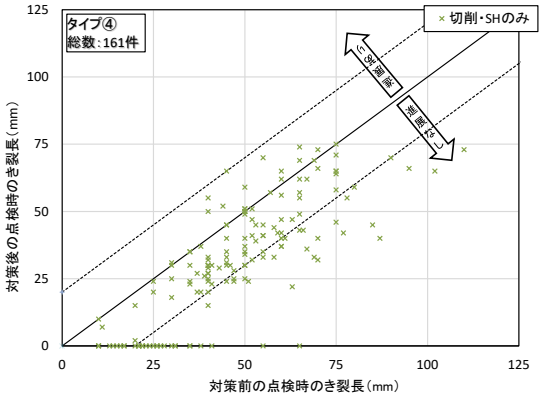


図-3 対策前後の点検時のき裂長の関係

抑制効果は確認されている．しかしながら，ストップホールのみ実施された状態で，き裂発生部以外の周辺の溶接部へどのような影響が生じるかは明らかでない．本検討は，実橋での最大級のき裂とストップホールを模擬した FEA を実施し，応力性状および変形から周辺部位への影響の分析を行うとともに，応急対策後の周辺部位の応力増加によるき裂発生可能性(疲労リスク)の評価を行った．

2．解析概要

(1) 解析条件

解析ソフトは Midas FEA NX 2022 を用い，3 次元弾性解析を行った．解析モデルは全ての部材をソリッド要素でモデル化した．材料条件は，弾性係数を 2.0×10^5 N/mm^2 とし，ポアソン比を 0.30 とした．解析対象と荷重条件を**図-4** に示す．U リブ本数は 4 本とし，U リブの配置間隔は同様のモデルを使用している文献 [3]を参考に 640 mm とした．解析モデルの寸法は阪神高速道路公団の鋼構造物標準図集 [6]（以下，標準図）を参考にした．横リブは板厚 9 mm とし，横リブ間隔は，長スパン側 3000 mm，短スパン側 1500 m とした．デッキプレート厚は 12 mm とした．解析モデルには，損傷部に密閉ダイアフラムが設置されていることが多い [1]ことを踏まえて，横リブから 200mm 位置の全 U リブに密閉ダイアフラムを設けた．U リブと横リブの溶接ビードをモデル化することとし，脚長は 5 mm とした．

載荷位置は，横リブ交差部溶接部の応力への影響が大きい載荷位置 [1]を参考に，**図-4 (a)** の 5 箇所とした．載荷荷重はダブルタイヤ 1 輪を模擬し，200 mm ×200 mm の載荷面積に 150 kN とした．なお，荷重は既往の活荷重実態調査において計測された最大軸重 [7] を参考に決定した．

解析モデルの境界条件は，主桁下フランジ下面を全自由度固定とした．

(2) 解析ケース

解析ケースを**表-1** に示す．解析ケースは，き裂なし，U リブ進展き裂を模擬，横リブ進展き裂を模擬したケースをそれぞれ original，④-1，④-2 とした．き裂は，U リブの変形による応力集中が大きくなる溶接止端部 [2]を参考に，**図-1 (b)** に示す R4 リブのスリット側溶接止端部にモデル化した．き裂の進展方向および長さは，阪神高速で発見された最大級のき裂を模擬した．き裂の接触面は応力を伝達しないモデルとした．き裂の先端には，鋼床版疲労き裂応急

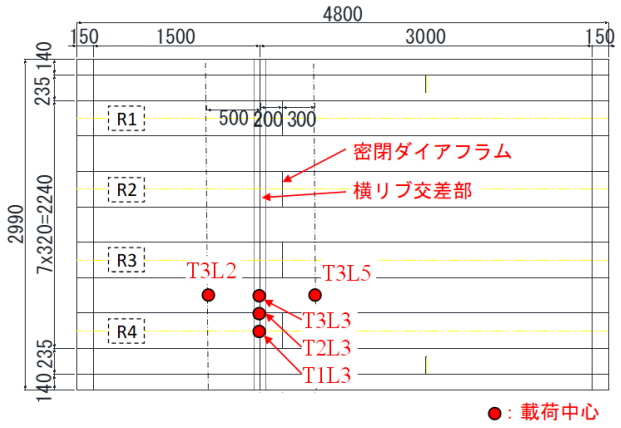
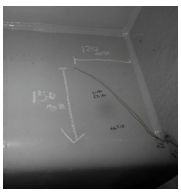
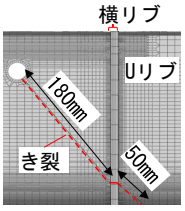
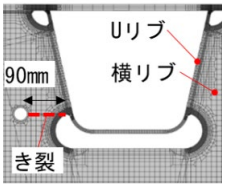


図-4　解析モデル（単位：mm）

表-1　解析ケース

	original	④-1	④-2
参考としたき裂の状況	き裂なし		
き裂モデル化状況	き裂なし		

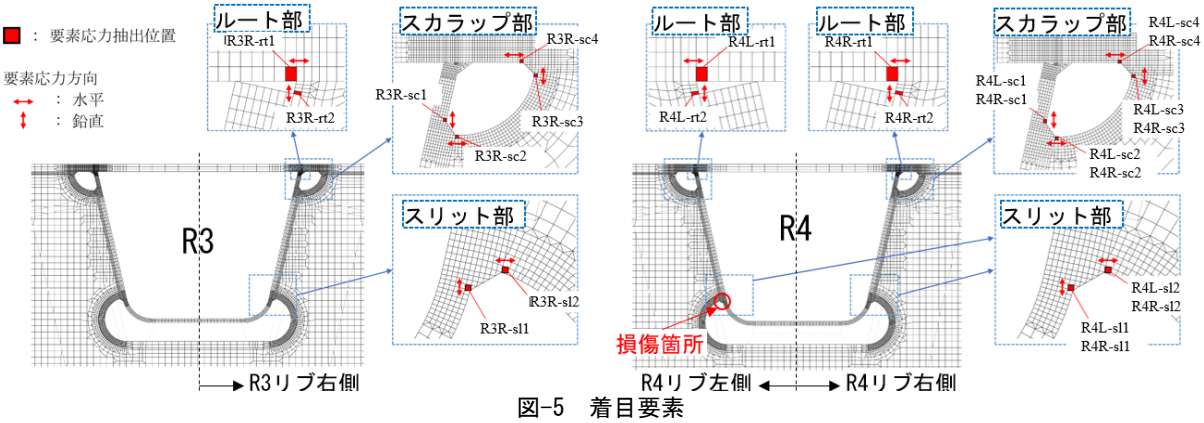


図-5　着目要素

処置施工要領[4]に基づき直径 25 mm のストップホールをモデル化した．

着目要素を**図-5** に示す．着目要素は，R3 リブ右側および R4 リブの溶接部の要素とし，U リブ側，横リブ側の要素に対して，き裂の要因となる溶接線直交方向の直応力を取得した．

3．解析結果

(1) 評価方法

original に対して**図-4 (b)** の載荷位置で解析を実施したときの，各着目要素の応力の最大値および最小値を**表-2** に示す．本検討では，**表-2** の応力を，U リブ鋼床版の溶接部周辺において，き裂がない状態で発生する応力の最大値であると考え，評価応力とした．④-1 および④-2 の着目要素の応力が評価応力を超えているか否かで疲労リスクの評価を行った．

(2) 代表載荷位置における結果

各解析ケースの**図-5** の着目要素における直応力の比較を**図-6** に示す．なお，ここでは**図-4 (a)** の 5 箇所の載荷位置のうち，original の sl1 要素の応力が最大となった T3L5 載荷時の結果を代表として示している．

図-6 (a) より，R3 リブ右側のルート部およびスカラップ部は，④-1 および④-2 の全ての着目要素の応力が original より大きかった．これは，き裂により R4 リブ左側の横リブに応力が伝達されないため，R3 リブ右側の横リブが受け持つ応力が増加したためと考えられる． R3 リブ右側の応力と評価応力とを比較すると，ルート部，スカラップ部，スリット部全ての着目要素の応力が評価応力より小さく，疲労リスクは小さいと考えられる．

図-6 (b) より，R4 リブ左側のルート部およびスカラップ部の応力は評価応力より小さかった．④-1 のスリット部は，き裂により着目要素に応力が伝達されにくいため，応力が小さかったと考えられる．④-2 のスリット部 2 箇所の着目要素の応力は，評価応力の 1.09 倍程度であった．これは，き裂により R4 リブ左側に伝達される応力が増加したためと考えられる．

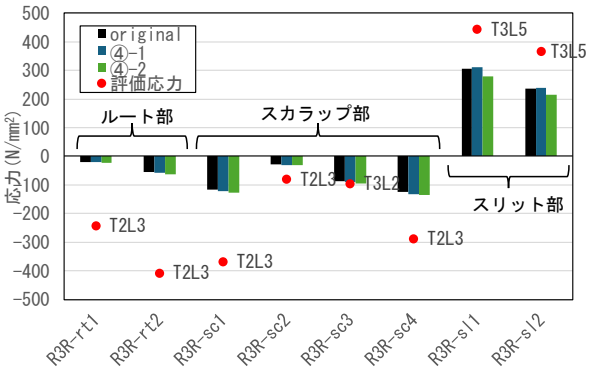
図-6 (c) より，R4 リブ右側のルート部およびスカラップ部の応力は評価応力より小さかった．④-1 のスリット部は，original に対する応力が sl1 は 1.35 倍，sl2 は 1.31 倍であった．**図-7** に T3L5 載荷時の横リブ交差部の変形図を示す．sl1 の応力が評価応力の 1.35 倍となったのは，**図-7 (a)** に示した通り，き裂の開口により U リブのねじれ変形が大きくなり，それを横リブが拘束することで着目要素の応力集中が増加したためと考えられる．④-2 のスリット部 2 箇所の着目要素の応力は，original の 1.05 倍程度であり，④-1 と比べて original に対する応力の倍率が小さかった．これは，**図-7 (b)** に示すように，き裂部は鉛直方向の変形が大きい一方，ねじれ方向の変形は小さく，ねじれ変形に起因する着目要素の応力集中が小さかったためと考えられる．

(3) 評価応力に対する応力の比率

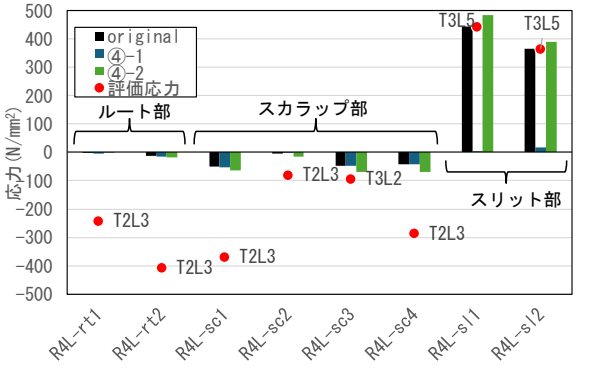
図-4 (a) に示した 5 箇所の載荷条件での解析結果のうち，応力の絶対値が評価応力以上となった載荷

表-2　original の応力の最大値および最小値

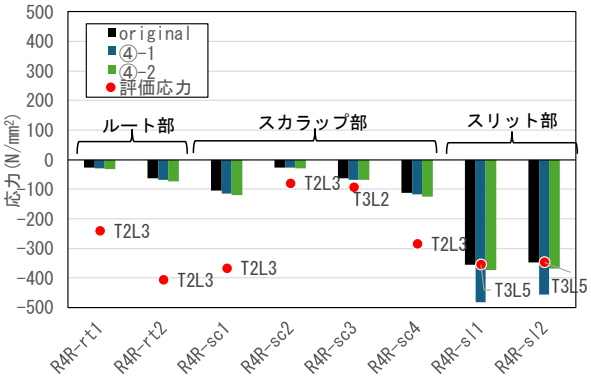
最大値			最小値		
着目要素	載荷位置	応力(N/mm^2)	着目要素	載荷位置	応力(N/mm^2)
R3R-rt1	T2L3	9	R4R-rt1	T2L3	-242
R3R-rt2	T2L3	13	R4R-rt2	T2L3	-407
R3R-sc1	T2L3	1	R4R-sc1	T2L3	-369
R4L-sc2	T3L3	7	R4R-sc2	T2L3	-80
R4L-sc3	T2L3	61	R3R-sc3	T3L2	-94
R3R-sc4	T1L3	-6	R4R-sc4	T2L3	-286
R4L-sl1	T3L5	444	R4R-sl1	T3L5	-356
R4L-sl2	T3L5	367	R4R-sl2	T3L5	-349



(a) R3リブ右側

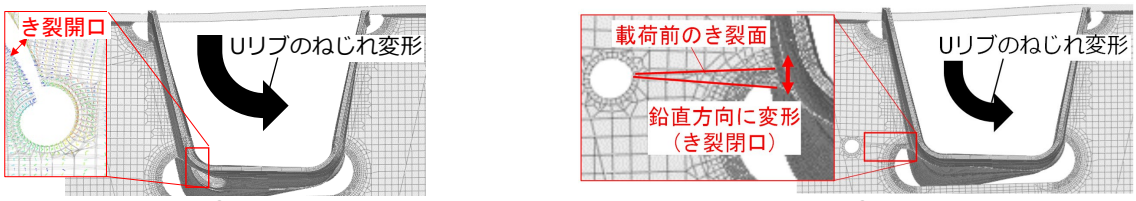


(b) R4リブ左側



(c) R4リブ右側

図-6　直応力の比較



(a)④-1　　(b)④-2

図-7　T3L5 載荷時の変形図（×50 倍）

表-3　応力の絶対値が評価応力以上となった載荷条件と着目要素

載荷位置	着目部位	着目要素		評価応力 (N/mm²)	④-1		④-2	
					発生応力 (N/mm²)	評価応力に対する比率	発生応力 (N/mm²)	評価応力に対する比率
T2L3	ルート部	R4リブ右側	R4R-rt1	-242	-243	1.00	-249	1.03
			R4R-rt2	-407	-408	1.00	-419	1.03
	スカラップ部		R4R-sc1	-369	-370	1.00	-385	1.05
			R4R-sc2	-80	-80	1.00	-83	1.04
			R4R-sc4	-286	-287	1.00	-301	1.05
T3L2	スカラップ部	R3リブ右側	R3R-sc3	-94	-94	1.00	-103	1.10
		R4リブ左側	R4L-sc3	-94			-96	1.02
T3L5	スリット部	R4リブ左側	R4L-sl1	444			484	1.09
			R4L-sl2	367			389	1.06
		R4リブ右側	R4R-sl1	-356	-481	1.35	-372	1.05
			R4R-sl2	-349	-457	1.31	-368	1.05

条件と着目要素の組み合わせを抽出し，**表-3** に示す．ルート部およびスカラップ部は，評価応力に対する④-1 および④-2 の応力が最大で 1.09 倍となった．本検討は，実橋における最大級のき裂を再現している点，き裂部を応力伝達しないモデル化としている点で，着目要素の応力は安全側の評価になっている．実橋での溶接部付近の発生応力は，一般的には本検討の着目要素の応力より小さいと考えられる．この点を踏まえると，評価応力の 1.1 倍程度は疲労リクが小さいと考えられる．

一方，スリット部は R4 リブ右側の着目要素において，評価応力に対する応力が最大で 1.4 倍程度である．これは，主桁ウェブの拘束の影響を受けて応力集中度が大きくなったためと考えられる．

4．まとめ

本検討は，実橋での最大級のき裂とストップホールを模擬した FEA を実施し，応力性状および変形から周辺部への影響の分析を行うことで，応急対策後の周辺部位の疲労リスク評価を行った．得られた結果を以下に示す．

1） Uリブ進展き裂，横リブ進展き裂，ストップホールを模擬した U リブ鋼床版の FEA では，ルート部およびスカラップ部は，き裂がない場合に対する応力が最大でも 1.1 倍程度であり，疲労リスクは比較的小さいと考えられる．
2） スリット部は，着目する横リブ交差部に対してねじれの位置となる載荷条件において，き裂により応力が増加し，特に U リブ側にき裂が発生する場合に応力が最大で 1.4 倍となった．
3） スリット部は，まとめ 2）以外の載荷条件においては，き裂がない場合に対する応力が最大でも 1.1 倍であり，疲労リスクは比較的小さいと考えられる．

本検討は 3. (3) に示した通り安全側のモデル条件で評価を行っている．今後，主桁近傍の U リブにき裂が発生したときの周辺部位の疲労リスク評価を行う場合は，より実態に近いモデル条件に更新し，発生応力が本検討より下がるか確認するとともに，発生応力が評価応力を超える部位がある場合は，疲労リスクが大きいと判断する．

参考文献

1) 三木千壽，舘石和雄，奥川淳志，藤井裕司：鋼床版縦リブ・横リブ交差部の局部応力と疲労強度，土木学会論文集，No.519， pp,127-137，1995.
2) 夏秋義広，坂野昌弘，高田佳彦，平野敏彦，瓦林誠：鋼床版の U リブと横リブ交差部の疲労き裂に着目した FEM 解析による対策検討，土木学会第 61 回年次学術講演会，1-563，2006.9.
3) 独立行政法人土木研究所，川田工業株式会社：鋼床版橋梁の疲労耐久性向上技術に関する共同研究（その５）報告書，2010.1.
4) 阪神高速道路株式会社：既設鋼床版疲労対策マニュアル【付録】鋼床版疲労き裂応急処置施工要領，2023.6.
5) 阪神高速道路株式会社：既設鋼床版疲労対策マニュアル，2023.7.
6) 阪神高速道路公団：鋼構造物標準図集，平成 3 年.
7) 独立行政法人土木研究所，構造物メンテナンス研究センター，橋梁構造研究センター：鋼床版デッキプレート進展き裂に対するデッキプレート厚板化の効果に関する検討，平成 24 年 3 月.