

平成29年度 橋梁技術発表会

ここまで進んだ鋼床版の疲労対策
～垂直補剛材上端部と架設用吊金具ももう大丈夫～

鋼床版の垂直補剛材上端部と 架設用吊金具残し部の疲労対策

技術委員会 床版小委員会 鋼床版部会

小笠原照夫 井口 進 内田大介 奥村 学
片野俊一 齊藤史朗 林 暢彦 松下裕明



発表内容

1. 垂直補剛材上端部の疲労対策

国立研究開発法人土木研究所との共同研究「鋼床版の疲労対策技術の信頼性向上に関する研究」の一部

2. 架設用吊金具残し部の疲労対策

九州大学との共同研究

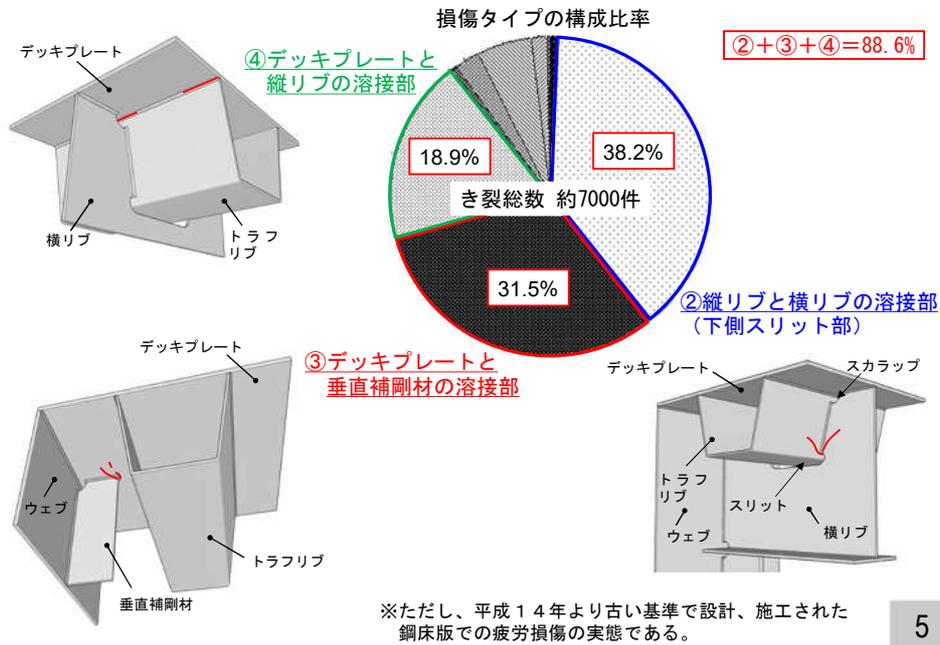
1. 垂直補剛材上端部の 疲労対策

(1) 鋼床版の疲労損傷の実態

き裂発生部位	
①	縦リブと横リブ(ダイヤフラム)の溶接部(上側スカラップ部)
②	縦リブと横リブ(ダイヤフラム)の溶接部(下側スリット部)
③	デッキプレートと垂直補剛材の溶接部
④	デッキプレートと縦リブの溶接部
⑤	デッキプレートと縦リブスカラップの溶接部(現場継手部)
⑥	デッキプレートと横リブ(ダイヤフラム)の溶接部
⑦	縦リブと縦リブの突合せ溶接部
⑧	縦リブと端ダイヤフラムの溶接部
⑨	横リブ(ダイヤフラム)と主桁ウェブの溶接部

き裂発生部位で9種類に分類

(1) 鋼床版の疲労損傷の実態



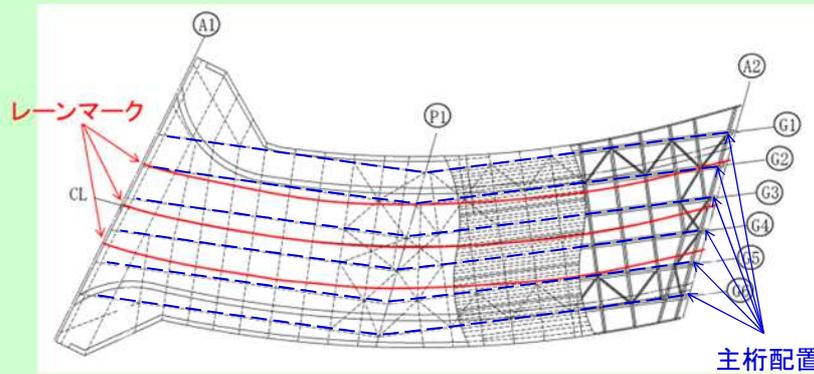
(2) 損傷原因と対策

	き裂発生部位	疲労対策
①	縦リブと横リブ(ダイヤフラム)の溶接部 (上側スカラップ部)	道示18.9.4コーナー溶接(埋戻し) 指針5.3.6縦リブと中間横リブまたは横げたの交差部(標準構造)
②	縦リブと横リブ(ダイヤフラム)の溶接部 (下側スリット部)	道示18.9.4コーナー溶接解説(標準構造)【スリット形状の見直し】 指針5.3.6縦リブと中間横リブまたは横げたの交差部(標準構造)
③	デッキプレートと垂直補剛材の溶接部	指針5.3.9縦げた(大型車輪荷重が常時載荷される位置直下に縦げたや主げたウェブを原則配置しない)
④	デッキプレートと縦リブの溶接部	道示9.4.5デッキプレートの最小版厚(大型自動車の輪荷重が常時載荷される位置直下は16mm以上) 道示18.9.2デッキプレートに対する縦方向溶接(溶込み量はリブ板厚の75%以上) 指針5.3.1閉断面リブとデッキプレートの溶接(溶込み量はリブ板厚の75%以上)
⑤	デッキプレートと縦リブスカラップの溶接部 (現場継手部)	道示18.9.3デッキプレートの溶接の検査(スカラップ幅80mm) 指針5.3.3縦リブの継手(縦リブ支間中央部のL/2の範囲に設けない、スカラップ幅80mm)
⑥	デッキプレートと横リブ(ダイヤフラム)の溶接部	道示18.9.4コーナー溶接(埋戻し) 指針5.3.6縦リブと中間横リブまたは横げたの交差部(標準構造)
⑦	縦リブと縦リブの突合せ溶接部	道示18.9.1閉断面リブの溶接継手(現場溶接施工要領例)
⑧	縦リブと端ダイヤフラムの溶接部	指針5.3.7縦リブと端横リブまたは端横げたの交差部(標準構造)
⑨	横リブ(ダイヤフラム)と主桁ウェブの溶接部	損傷数の少ない特異な事例

(3) 課題

輪荷重直下に主桁ウェブを配置しないのは困難

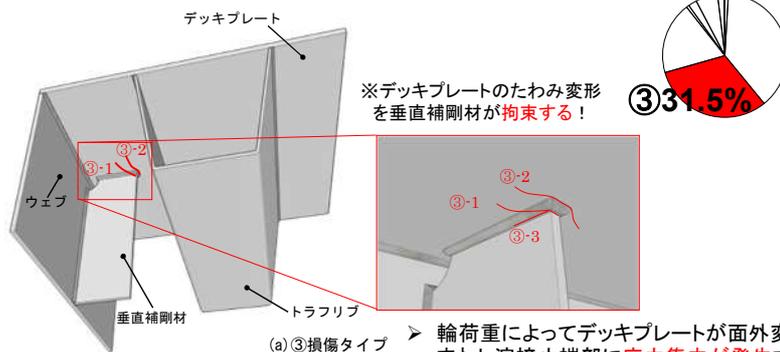
・車線が曲線で、主桁が直線配置の事例



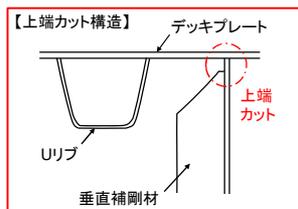
➤ 大型車輪荷重の走行位置と主桁ウェブは必ず交差する箇所が発生する。

7

(4) 上端カット構造の検討内容



(a) ③損傷タイプ ➤ 輪荷重によってデッキプレートが面外変形し、まわし溶接止端部に応力集中が発生する。



※デッキプレートのだわみ変形を垂直補剛材で拘束しない！

➤ 垂直補剛材上端部の疲労対策に対する課題を踏まえて、**垂直補剛材の上端カット構造**の有効性を検討する。

8

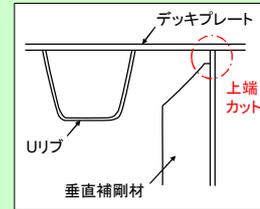
(4) 上端カット構造の検討内容

実態調査

- ・橋梁製作会社へのアンケート
- ・解析に用いる橋梁(鋼床版)諸元を把握

局部応力の検討

- ・上端溶接と上端カットの局部応力を比較



上端カット構造

曲げ耐荷力の検討

- ・垂直補剛材上端のギャップ量が曲げ耐荷力に与える影響

せん断耐荷力の検討

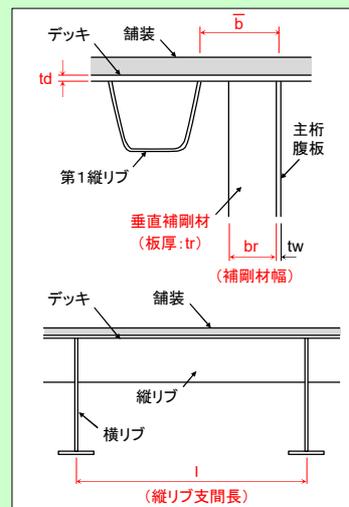
- ・垂直補剛材上端のギャップ量がせん断耐荷力に与える影響

9

(5) 鋼床版構造の実態調査

実態調査の結果、代表的な諸元は以下であることがわかった。

- ・デッキ厚 td は、12mmあるいは16mm
- ・補剛材の断面形状 $br \times tr$
 - ①150mm \times 12mm ($tw=14$ mm)
 - ②190mm \times 15mm ($tw=14$ mm)
 - ③110mm \times 9mm ($tw=9$ mm)
- ・主桁腹板—第1縦リブ間の距離 \bar{b} (250mm)
- ・縦リブ支間長 l は、2500mm



これらの諸元を解析モデルに反映

<解析パラメータ>

$\bar{b} = 200, 250, 300$ mm

$l = 2000, 2500, 3000$ mm

10

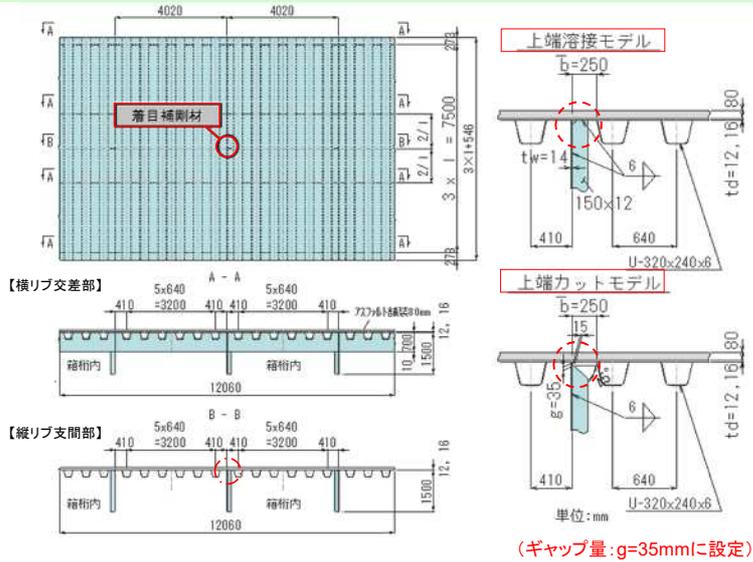
(6) 局部応力

解析モデル

デッキ厚 $t_d = 12, 16\text{mm}$

舗装厚 80mm

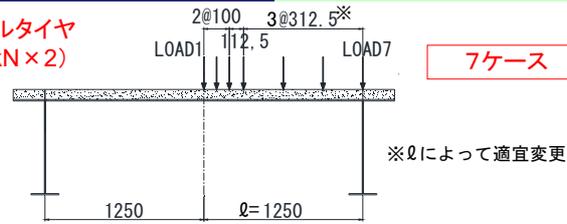
(弾性係数: 500N/mm^2 夏場を想定)



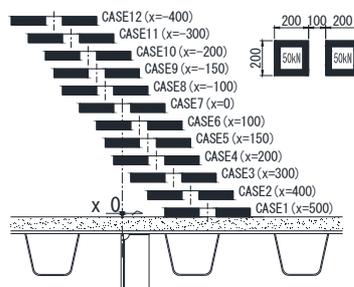
11

(6) 局部応力

載荷荷重: ダブルタイヤ
($50\text{kN} \times 2$)



(a) 橋軸方向荷重ケース



(b) 橋軸直角方向荷重ケース

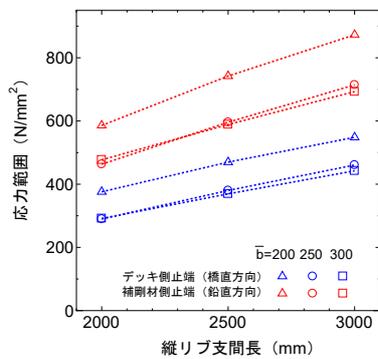
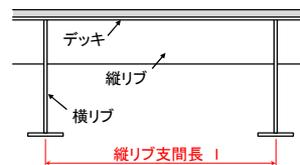
荷重条件

全84ケース

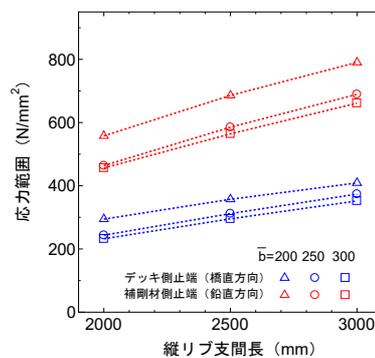
12

(6) 局部応力

縦リブ支間長が長くなるほど、発生応力も増加する



(a) デッキ厚td=12



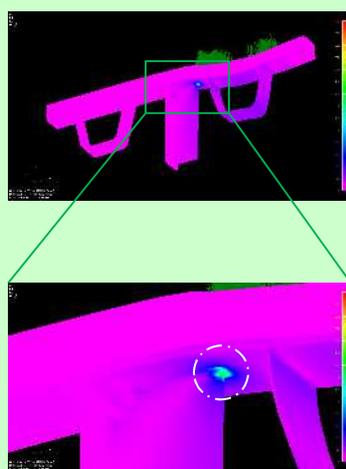
(b) デッキ厚td=16

上端溶接における縦リブ支間長の影響

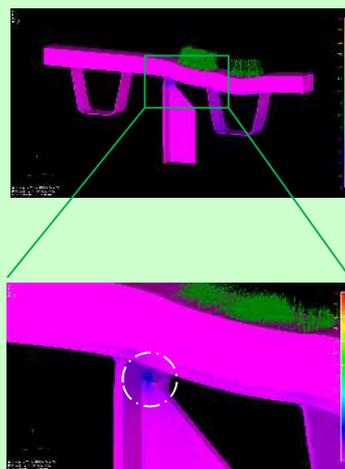
13

(6) 局部応力

局部応力が低減



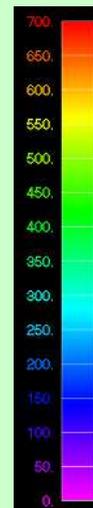
上端溶接モデル(td=12)



上端カットモデル(td=12)

Mises応力カウンター図

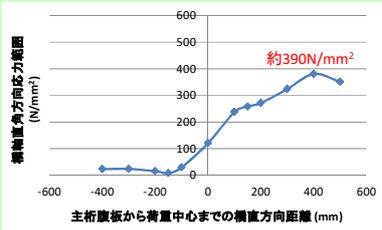
(N/mm²)



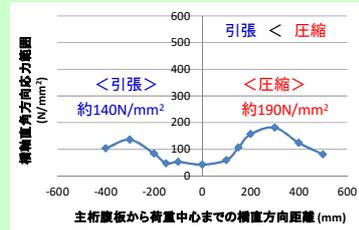
14

(6) 局部応力 (デッキ厚 $t_d=12\text{mm}$)

垂直補剛材の断面寸法 $150\text{mm} \times 12\text{mm}$
 第1縦リブまでの距離 $b=250\text{mm}$



(a) デッキ側止端部



(a) 腹板側止端部

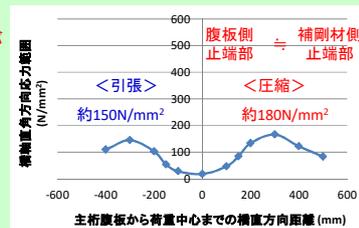


(b) 補剛材側止端部

上端溶接モデル($t_d=12$)



局部応力が
 $1/3 \sim 1/2$ に
 低減



(b) 補剛材側止端部

上端カットモデル($t_d=12$)

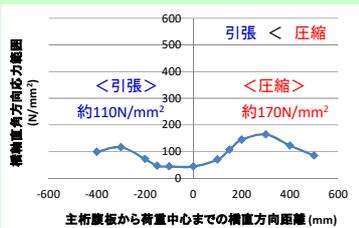
15

(6) 局部応力 (デッキ厚 $t_d=16\text{mm}$)

垂直補剛材の断面寸法 $150\text{mm} \times 12\text{mm}$
 第1縦リブまでの距離 $b=250\text{mm}$



(a) デッキ側止端部



(a) 腹板側止端部



(b) 補剛材側止端部

上端溶接モデル($t_d=16$)



局部応力が
 $1/3 \sim 1/2$ に
 低減



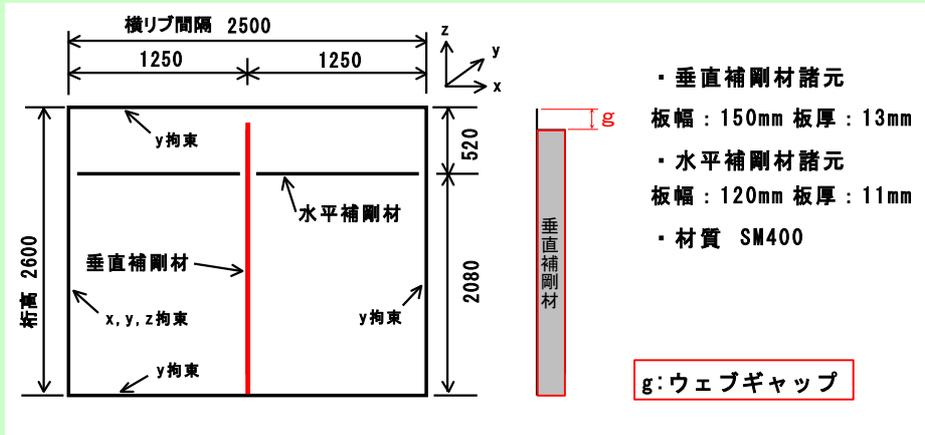
(b) 補剛材側止端部

上端カットモデル($t_d=16$)

16

(7) 曲げ耐荷力

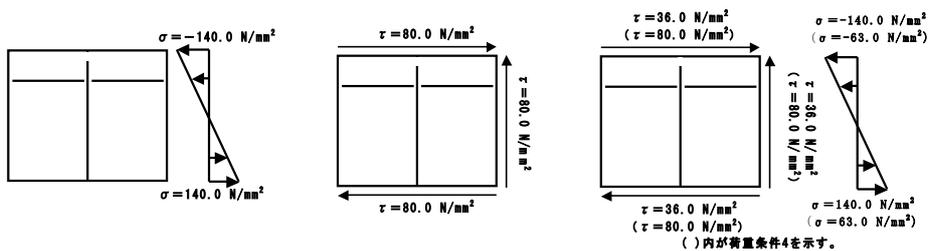
桁高に対する垂直補剛材のウェブギャップ量の限界値の把握



線形座屈固有値解析モデル

17

(7) 曲げ耐荷力



(1) 荷重条件1

【純曲げ】
(曲げ応力最大)

(2) 荷重条件2

【純せん断】
(せん断応力最大)

(3) 荷重条件3, 4

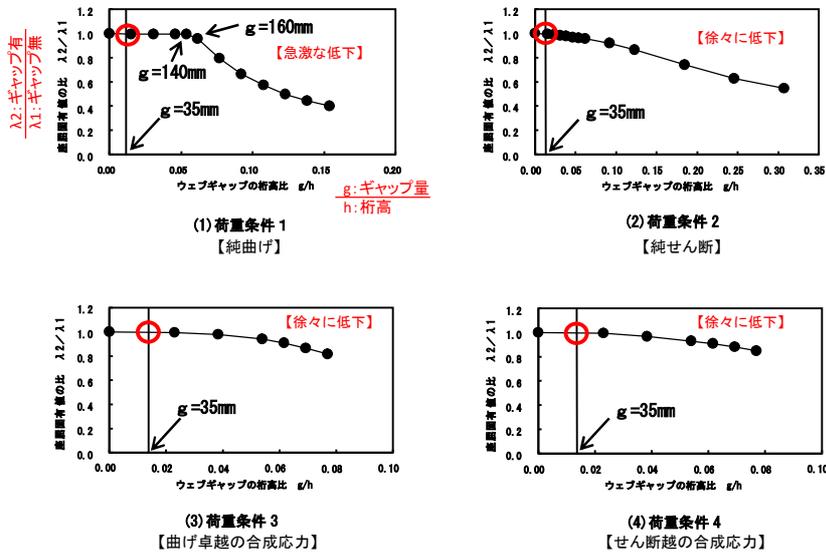
【合成応力】
(曲げ／せん断卓越)

荷重条件

18

(7) 曲げ耐荷力

ギャップ量 $g=35\text{mm}$ では曲げ耐荷力は低減しない

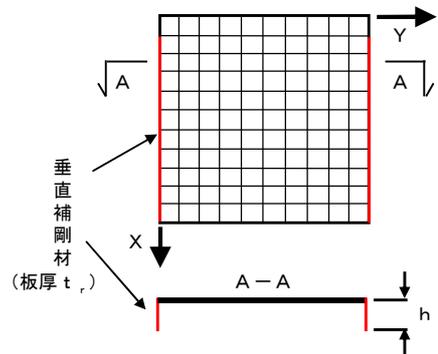
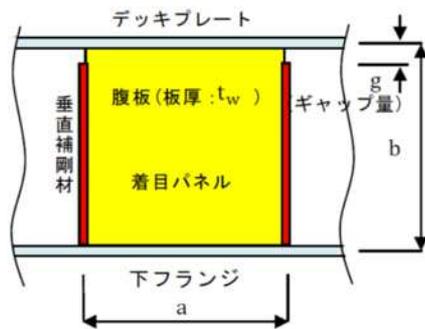


垂直補剛材のウェブギャップが座屈固有値に与える影響

19

(8) せん断耐荷力

桁高に対する垂直補剛材のウェブギャップ量の限界値の把握



解析対象

【純せん断を受ける腹板】

解析モデル

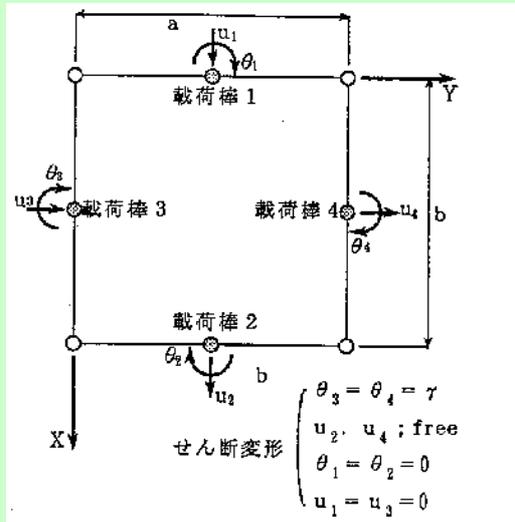
- ① 線形座屈固有値解析
- ② 弾塑性有限変位解析

20

(8)せん断耐力

着目パネルに純せん断を作用

【境界条件】
上下辺:単純支持
左右辺:自由
(垂直補剛材)



【载荷方法】
载荷棒3, 4
に回転変位

境界条件および载荷方法

21

(8)せん断耐力

解析パラメータ

腹板高さ 1500mm

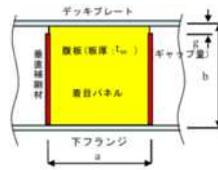
着目パラメータ	線形座屈解析	弾塑性解析
使用鋼材	SM400 ($\sigma_y = 240\text{N/mm}^2$) 弾塑性解析時:完全弾塑性(移動硬化)	
アスペクト比 $\alpha(a/b)$	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	1.0
幅厚比パラメータ R_τ	0.5, 1.0, 1.5	
ギャップ量 $g(\text{mm})$ (腹板高比)	0, 35, 75 (0, 1/43, 1/20)	0, 75, 300 (0, 1/20, 1/5)

$$R_\tau = (b/t_w) \cdot \sqrt{(\tau_y/E) \cdot \{12(1 - \mu^2)/(\pi^2 k_\tau)\}}$$

22

(8)せん断耐力

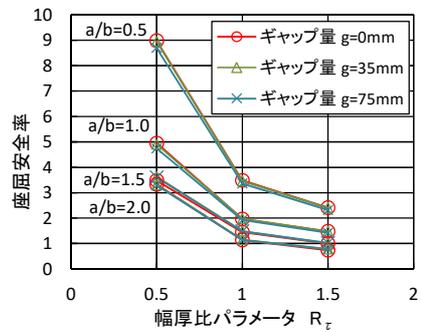
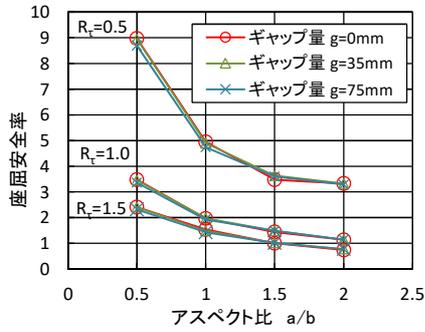
線形座屈解析結果



アスペクト比 a/b

幅厚比パラメータ

$$R_{\tau} = (b/t_w) \cdot \sqrt{(\tau_y/E) \cdot \{12(1-\mu^2)/(\pi^2 k_{\tau})\}}$$



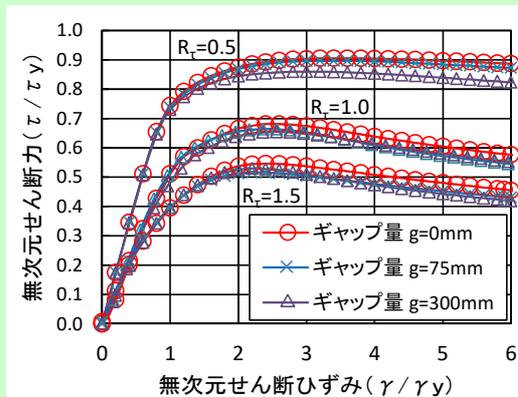
アスペクト比とギャップ量の影響

幅厚比パラメータとギャップ量の影響

ギャップ量が座屈安全率に与える影響は最大で5%程度

(8)せん断耐力

弾塑性有限変位解析結果



幅厚比パラメータ

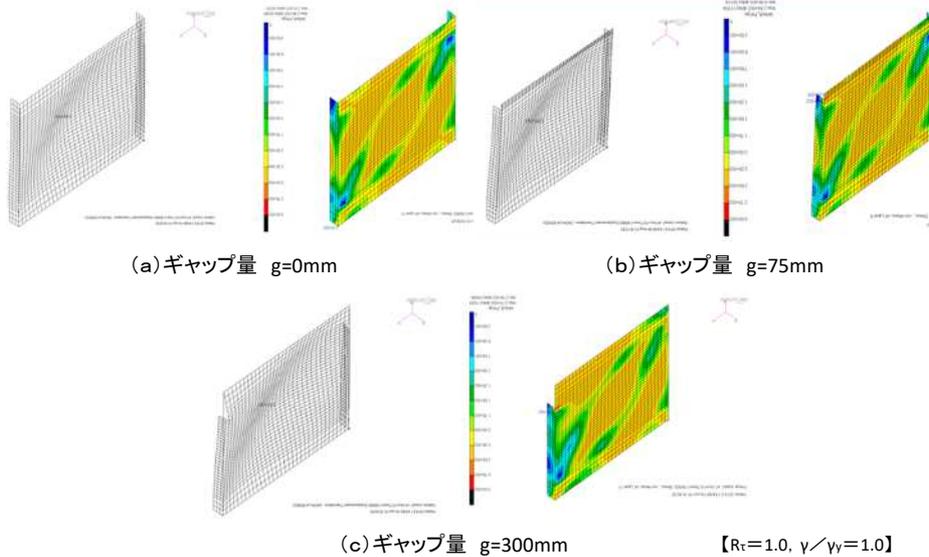
$$R_{\tau} = (b/t_w) \cdot \sqrt{(\tau_y/E) \cdot \{12(1-\mu^2)/(\pi^2 k_{\tau})\}}$$

最大せん断ひずみ
到達後も、せん断力
が急低下しない

せん断ひずみ－せん断応力関係

(8) せん断耐荷力

変形モードや腹板全体の応力分布は
ギャップ量による差異がほとんど見られない



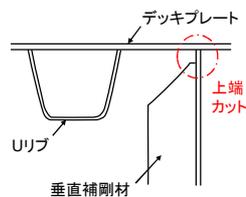
変形図(倍率5倍), Mises応力コンター図

25

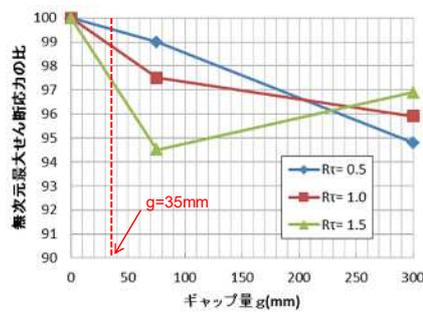
(8) せん断耐荷力

無次元最大せん断応力

ギャップ量 g	幅厚比パラメータ $R_\tau=0.5$		幅厚比パラメータ $R_\tau=1.0$		幅厚比パラメータ $R_\tau=1.5$	
	最大値	比	最大値	比	最大値	比
0mm	0.906	—	0.682	—	0.546	—
75mm	0.897	99.0%	0.665	97.5%	0.516	94.5%
300mm	0.859	94.8%	0.654	95.9%	0.529	96.9%



上端カット構造は、上端溶接構造
と同等である



ギャップ量の影響

26

(9)まとめ

垂直補剛材の上端溶接と上端カット(35mm,75mm)について、局部応力、曲げ耐荷力およびせん断耐荷力の観点から影響を検討した。

1)局部応力

上端カットにより大幅な応力低減効果が期待できる。今後、実験により耐久性を確認する必要がある。

2)曲げ耐荷力

35mm程度の垂直補剛材のウェブギャップを有する改良ディテールは、腹板補剛機能にはほとんど影響しないことが確認された。

3)せん断耐荷力

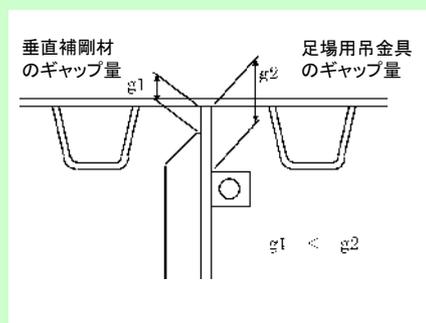
上端のギャップ量がせん断座屈耐荷力特性に与える影響は小さいことが分かった。

27

(10)補足

上端にギャップを設けた垂直補剛材の裏面に足場用吊金具を設けると、局部応力が大きくなることが懸念される。

鋼床版橋において、ウェブ上部に足場用吊金具を取り付ける場合には、ギャップ量を垂直補剛材のものより大きくするのが良い。



足場用吊金具の取付け例

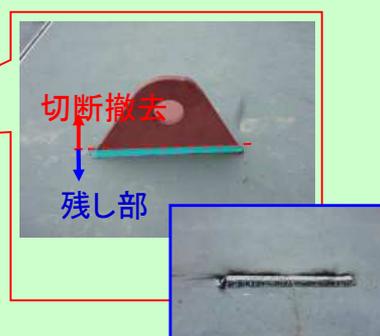
28

2. 架設用吊金具残し部の 疲労対策

29

2.1 概要

(1) 架設用吊金具



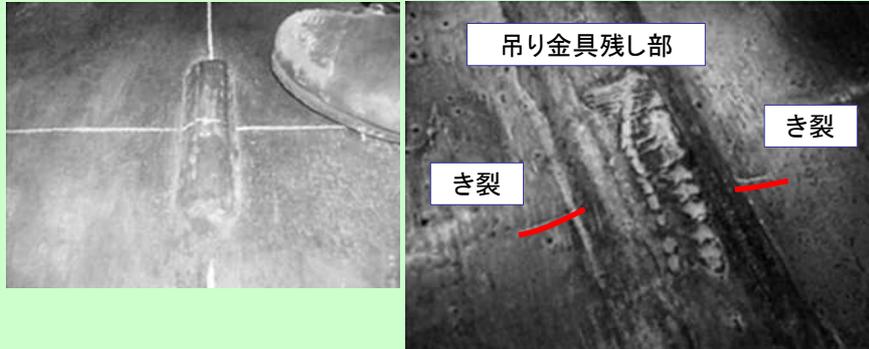
- ・架設用吊金具は架設完了後、切断撤去
- ・吊金具残し部からの疲労き裂防止のため**完全除去**の要求がある
- ・鋼床版と架設用吊金具残し部を一体に捉えて評価した事例無し



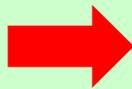
吊り金具の残し部近傍の応力性状を明らかにし
吊り金具残し部が疲労き裂発生に及ぼす影響について検討

30

(2) 疲労損傷事例



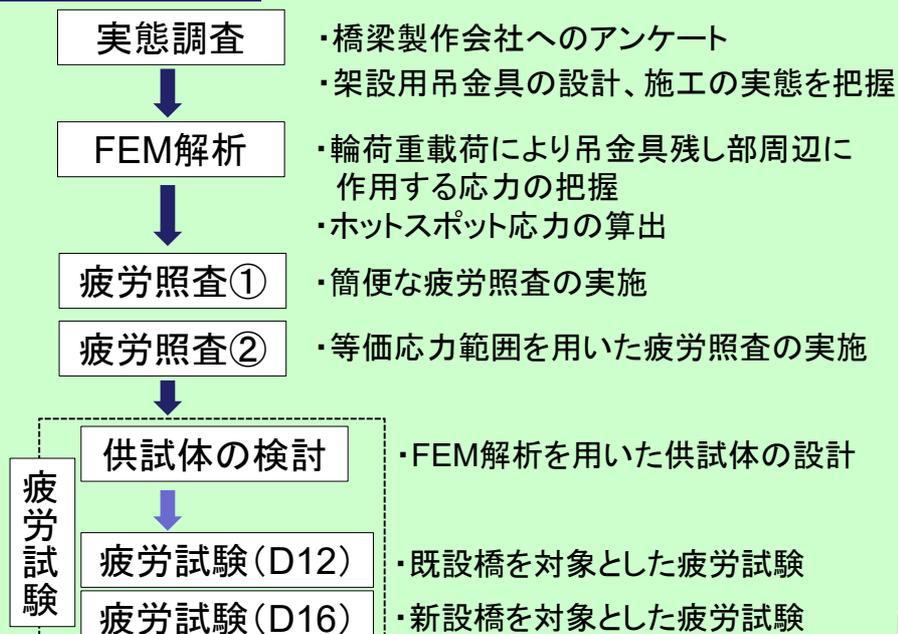
首都高速事務連絡資料より(H16年10月)



道路管理者によっては、吊金具残し部の平滑仕上げを要求 → 現場の負担大

31

(3) 検討フロー

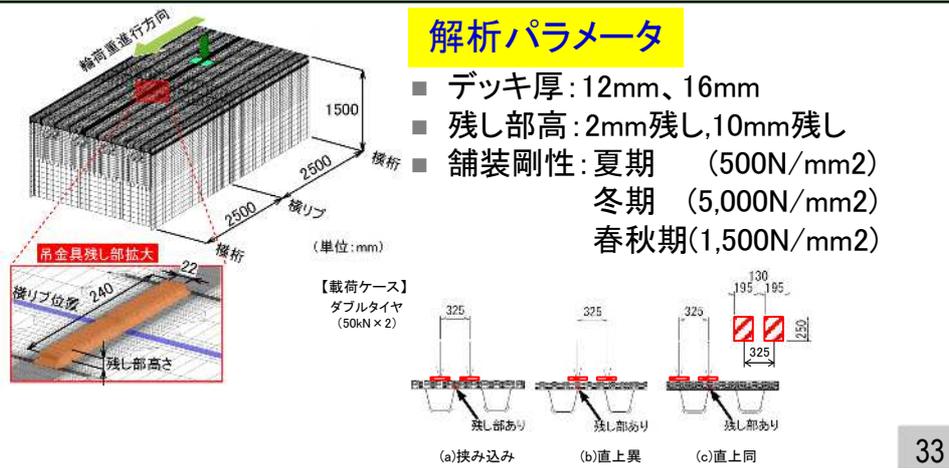


32

2.2 応力性状の把握と疲労照査

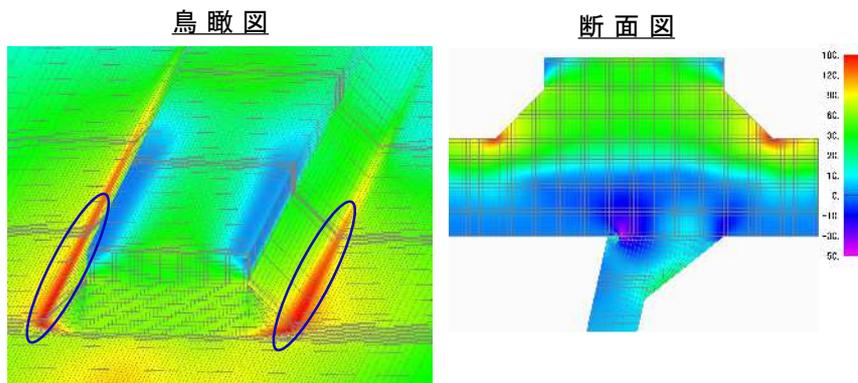
(1) FEM解析

鋼床版上の吊金具残し部近傍は、輪荷重の载荷位置によって、複雑な応力状態となる。



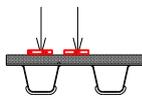
(2) 解析結果

解析ケース: 挟み込み载荷 デッキ12mm 残し部10mm



最大主応力コンター図

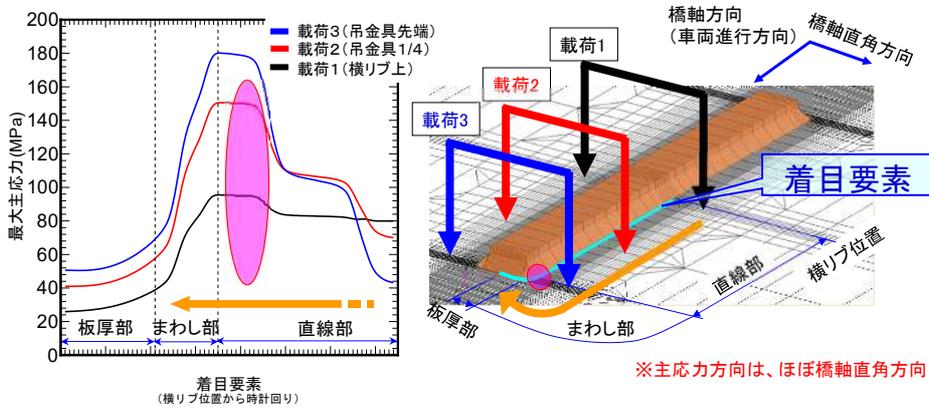
挟み込み载荷



- 最大主応力が最大となるケース(挟み込み载荷)
- 吊金具溶接止端部に応力集中
- 最大主応力に着目

(2) 解析結果

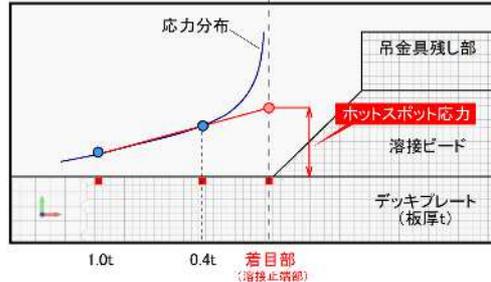
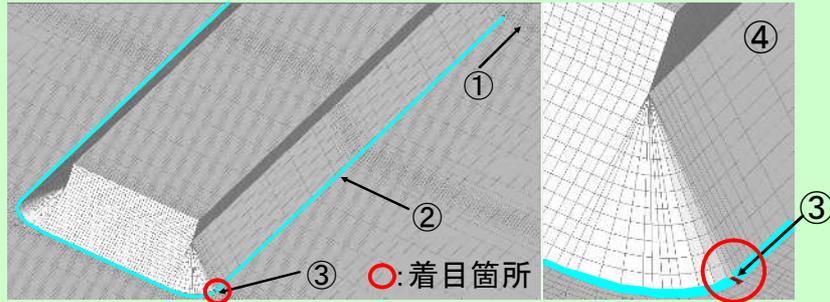
解析ケース: 挟み込み载荷 デッキ12mm 残し部10mm



- まわし溶接と直線部の境界付近で最大主応力が最大
- 载荷3(吊金具先端)で最大主応力の最大値が発生

35

(3) 簡便な疲労照査



③位置のホットスポット応力を用いて疲労照査を実施

36

(3) 簡便な疲労照査

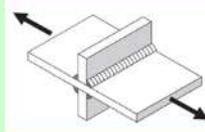
面外曲げ応力の取り扱い

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_m + (4/5)\Delta\sigma_b$$

$\Delta\sigma_m$: 膜応力成分

$\Delta\sigma_b$: 曲げ応力成分

【荷重非伝達十字継手】



E等級:
止端仕上げなし
D等級:
止端仕上げ

夏場の舗装剛性で算出した応力範囲

デッキ厚	吊金具高さ	打ち切り限界の応力範囲	
		E等級 62MPa	D等級 84MPa
12mm	10mm	100.3	
	2mm	90.9	
16mm	10mm	63.8	
	2mm	59.7	

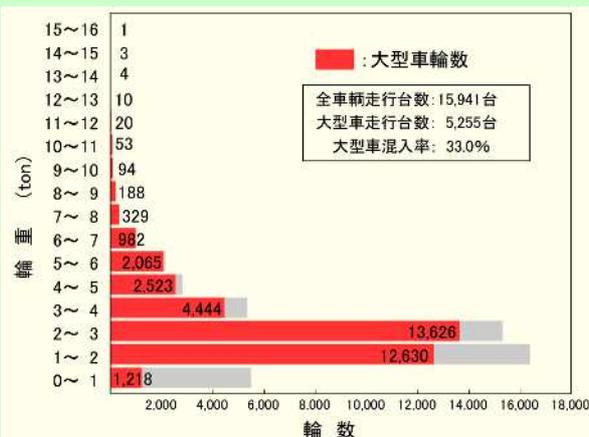
簡便な疲労照査の結果, 既設橋梁(12mm)においてNG

⇒等価応力範囲による疲労照査を実施

37

(4) 等価応力範囲を用いた疲労照査

国道357号(有明)での車重実態調査の結果における大型車の通行で生じる輪重の頻度分布(1日1方向1車線あたり)



中央値を利用し, 等価輪重(31.8kN)を求める

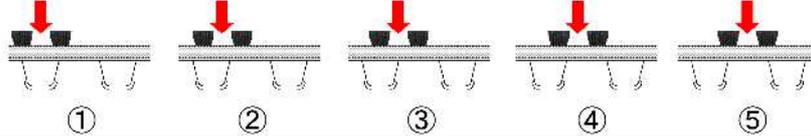
等価輪重に対応する応力範囲を決定

38

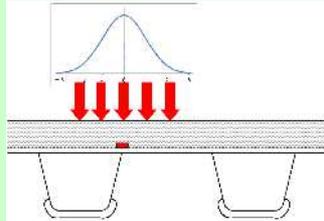
(4) 等価応力範囲を用いた疲労照査

載荷条件

①直上同、②挟み込み直上同、③挟み込み、④挟み込みと直上異、⑤直上異



5つの載荷条件は正規分布に従うと仮定



case	橋直方向 分担範囲(mm)	比率
(1)	~ -123.25	0.205
(2)	-123.25 ~ -42	0.185
(3)	-42 ~ +40.75	0.217
(4)	+40.75 ~ +122	0.185
(5)	+122 ~	0.208

標準偏差 $\mu=15\text{cm}$ と仮定

載荷回数は、四季によって各々25%ずつとした。

疲労強度の計算に必要な載荷回数を決定

39

(4) 等価応力範囲を用いた疲労照査

E等級 : 溶接まま 有明:5,255台

デッキ厚 (mm)	吊金具 残し部高さ (mm)	有明荷重による 疲労寿命 (年)	大型車許容台数 (台/車線・日)
12	2	22	1,157
	10	14	737
16	2	100<	6,734
	10	95	4,998

D等級 : 止端仕上げ 有明:5,255台

デッキ厚 (mm)	吊金具 残し部高さ (mm)	有明荷重による 疲労寿命 (年)	大型車許容台数 (台/車線・日)
12	2	57	2,999
	10	38	1,999
16	2	100<	29,514
	10	100<	17,940

➤ 大型車許容台数 ⇒ 設計寿命100年を満足

40

(5) 吊金具残し部の疲労対策範囲

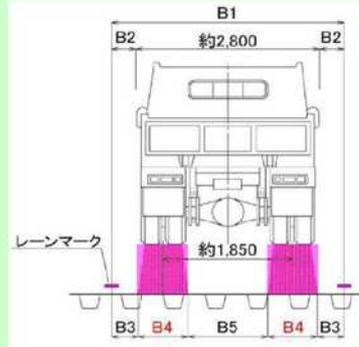
疲労上問題となるのは、「輪荷重位置」と「吊金具残し部」が一致するケース

一方、横断方向に両者が160mm程ずれると、発生応力は1/2程度に低下する



吊金具残し部の疲労対策範囲の提案

※B4範囲に吊金具を設置する場合、大型交通量に応じた処理を行えば、疲労寿命が確保できる。



	(mm)	主要幹線道路	幹線道路	補助幹線道路
車線幅	B1	3,500	3,250	3,000
車両横移動可能範囲	B2	350	225	100
疲労対策	不要	B3	315	315
疲労対策	必要	B4	1,020	770
疲労対策	不要	B5	830	1,330

41

(4) 等価応力範囲を用いた疲労照査

■ デッキ厚12mm

大型車交通量(台/日/車線)	吊金具の処置
1,150台未満	残し部2mm程度残し、 止端仕上げなし
1,150台以上3,000台未満	残し部2mm程度残し、 デッキ側止端仕上げ
3,000台以上	完全撤去

■ デッキ厚16mm

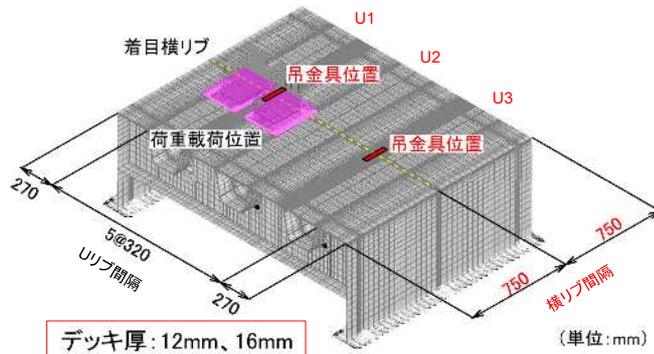
大型車交通量(台/日/車線)	吊金具の処置
6,700台未満	残し部2mm程度残し、 止端仕上げなし
6,700台以上29,500台未満	残し部2mm程度残し、 デッキ側止端仕上げ
29,500台以上	完全撤去

42

2.3 疲労試験

(1) 供試体の検討

■ 疲労試験供試体の試設計



吊金具残し部



吊金具残し部高さはいずれも10mm

⇒ 実構造の鋼床版と応力状態に差がないことを別途確認

43

(2) 静的載荷試験と疲労試験

■ 試験概要

供試体外観



載荷板・ブロック

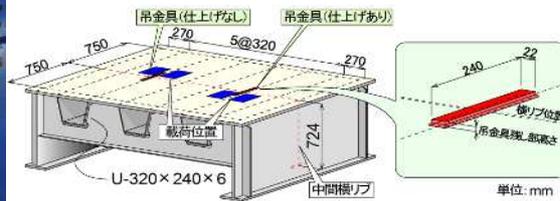


静的載荷試験では、着目部近傍のひずみ分布が解析値と概ね一致することを確認した。

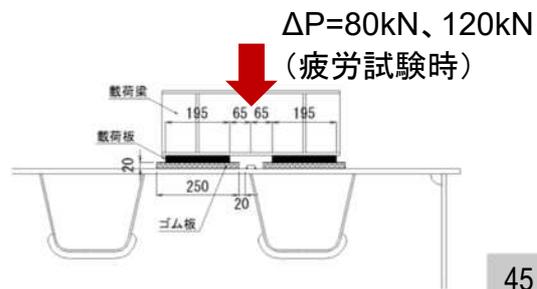
44

(2) 静的载荷試験と疲労試験

■ 疲労試験



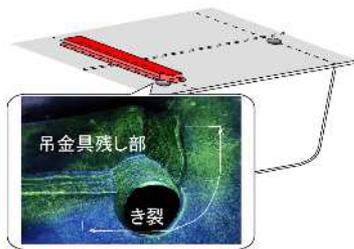
- 载荷位置は、応力状態が最も厳しくなる横リブから125mm離れた位置
- 载荷は、吊金具まわし溶接部をダブルタイヤ挟み込み



45

(3) D12供試体の疲労試験

【D12止端仕上げなし】

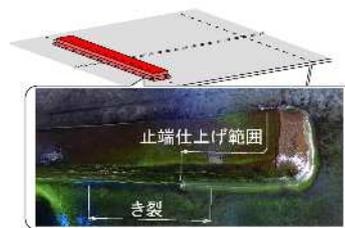


【試験終了後(累計400万回)】

$\Delta P = 80\text{kN}$ で300万回载荷後、
 $\Delta P = 120\text{kN}$ でさらに100万回载荷

累計340万回でひずみ低下

【D12止端仕上げあり】

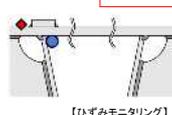
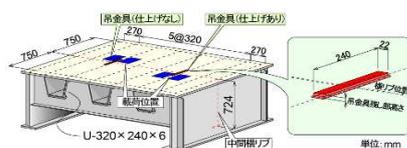


【载荷回数120万回時】

$\Delta P = 120\text{kN}$ で200万回载荷

180万回でひずみ低下

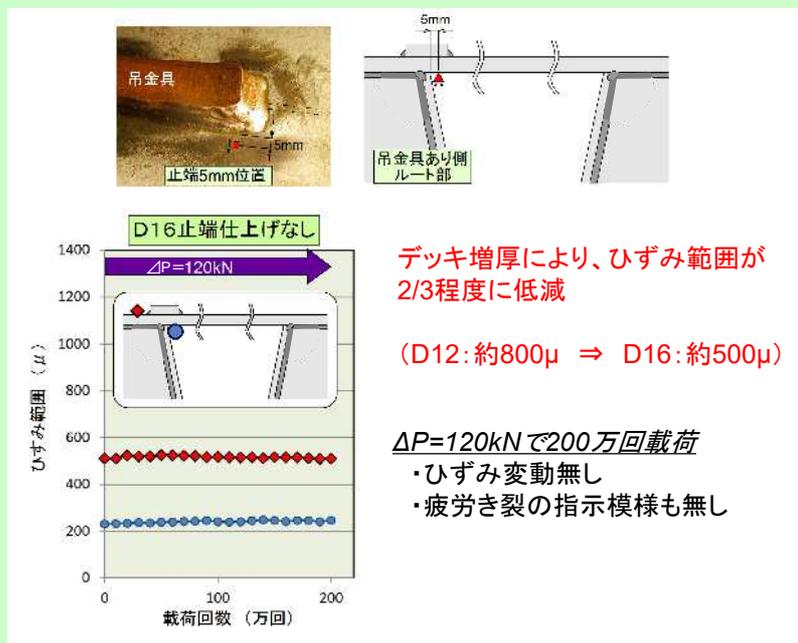
疲労損傷度の比較では、
2倍以上の疲労寿命



- 着目部♦のひずみ範囲は 800~900 μ

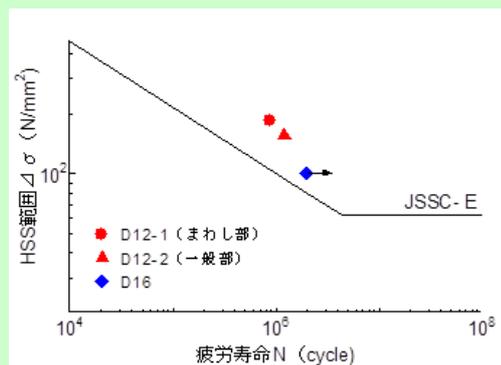
46

(4) D16供試体の疲労試験～止端仕上げなし



47

(5) S-N線図に基づいた疲労寿命の比較



HSS範囲に基づいたS-N線図の構築



鋼床版上の吊金具の疲労強度等級 = JSSC-E等級



疲労寿命: D12 < D16 (約6倍以上)

48

2.4 まとめ

- (1) 鋼床版上の吊金具残し部では、ダブルタイヤの挟み込み载荷となる時に、まわし溶接部で最も高い応力が発生する。輪荷重の载荷しない箇所の吊金具に疲労の問題はない。
- (2) 等価応力範囲による疲労照査
 - ① 大型車交通量に応じた処置で疲労寿命100年を確保できる。
 - ② デッキ厚16mmであれば、ほとんどの路線で吊金具残し部高さ2mmとすれば、疲労寿命100年を確保できる。
- (3) 疲労試験
D16供試体はD12供試体の約6倍以上の疲労寿命延伸が期待できる。

49

3. おわりに

以上、鋼床版の垂直補剛材上端部と架設用吊金具残し部の疲労対策について報告した。

- (1) 垂直補剛材上端部は、上端を35mmカットすることにより、局部応力を1/3～1/2程度に低減できるとともに、ウェブの曲げ耐荷力とせん断耐荷力に与える影響はわずかであることをFEM解析により明らかにした。
今後、疲労試験により耐久性の向上を検証する予定である。
- (2) 架設用吊金具残し部は、国道357号有明付近の実態調査結果から等価応力範囲を求め、吊金具残し部の疲労照査を実施し、大型車交通量と吊金具残し部の疲労寿命の関係を明らかにした。
さらに、輪重による疲労照査が必要な範囲を示し、当該範囲の大型車交通量と吊金具残し部の疲労対策を提案した。

50

ご清聴ありがとうございました

51