平成24年度　技術発表会

米国における鋼床版の
設計・施工・維持管理

－FHWAの最新の鋼床版指針の紹介－

一般社団法人日本橋梁建設協会 Japan Bridge Association　　鋼床版小委員会

発表内容

1．背景
2．FHWAマニュアルの構成
3．鋼床版の疲労
4．疲労設計
5．構造詳細
6．疲労設計事例
7．その他
8．今後の橋建協での取り組み

2

1．背 景

3

鋼床版（日本）の状況

・重交通路線での疲労損傷の発生
・国総研、土研、橋建協の共同研究等
・デッキプレート厚12mm⇒16mm
・仕様設計から合理的な疲労設計手法の確立

4

FHWAでの取り組み

FHWA（米国連邦道路管理局）より4年間活動成果として
“MANUAL FOR DESIGN, CONSTRUCTION, AND MAINTENANCE OF ORTHOTROPIC STEEL DECK BRIDGES”
が2012年2月に発刊されました。

日本橋梁建設協会においても、研究の成果を基に現在、高耐久性鋼床版　設計・施工の手引きを作成中ですが、**海外文献調査の一環**としてFHWA指針における疲労設計の考え方について紹介します。

ホームページ
http://www.trb.org/Main/Blurbs/166748.aspx
http://www.fhwa.dot.gov/bridge/pubs/if12027/if12027.pdf

5

2．FHWAマニュアルの構成

6

FHWAマニュアルの構成　（1/2）

まえがき
謝辞
第1章　序章（歴史と特徴）
第2章　適用事例
第3章　鋼床版構造
第4章　構造特性と解析
第5章　設計（3つの方法）
第6章　構造詳細

7

FHWSマニュアルの構成　（2/2）

第7章　施工（製作上の留意点）
第8章　点検，診断，補修
第9章　舗装
第10章　実験・試験
第11章　設計例
参考文献
付録A　標準トラフリブ形状
付録B　有限要素モデル化の指針
付録C　標準鋼床版パネル

8

3. 鋼床版の疲労

9

実務設計の発展

①縦リブ間隔305mmでデッキ厚9mm（第二次大戦後）
↓
疲労クラックによる損傷
・切削と再溶接による周期的な補修
・欧州では、鋼部材を補修し、スタッドを打ち、コンクリート101mmを敷設。

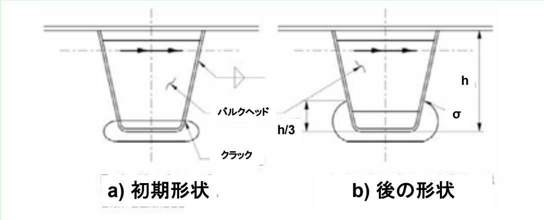
②1950年代に高強度鋼材、1990年代にはデッキ増厚

③初期の鋼床版は、バルクヘッドなし

④バルクヘッドは、Westgate Bridge（オーストラリア）のクラック対策

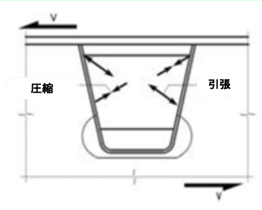
米国では、主に横リブ交差部を対象として検討している。

10

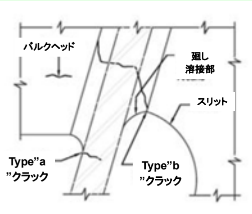


応力軽減用スリット形状

11

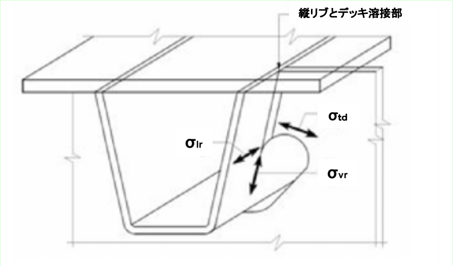


バルクヘッドを通る
水平せん断応力場



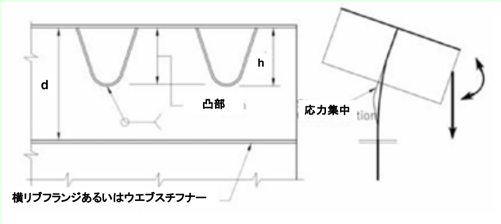
スリットに生じる
クラック

12



改良された滑らかなスリット終端

13



スリットがない時の縦リブの面外変形

メリット	デメリット
・製作上は、より経済的	・大きな縦リブ剛性が必要
・横リブウエブの面内ねじりを低減	・横リブウエブの面外応力が大きくなる
・デッキ曲げも低減→寿命が伸びる	

14

バルクヘッドの採用について

① 溶接終点をグラインダーで緩和することは、製作コストがかかる。

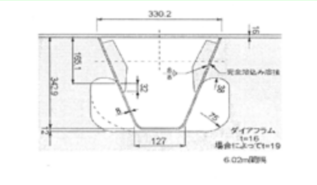
② バルクヘッド部の溶接損傷が検査できず、クラックが縦リブウエブに進展する可能性がある。

③ 横リブ配置前に縦リブとデッキプレートを組立てするので、横リブの直線性が保証されてなく、2次的変位と応力が付加される可能性がある。

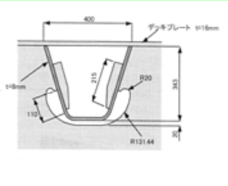
④ バルクヘッドは設けないことが望ましい。

15

最近の交差部の事例
（内リブ形式のディテール）



a) Bronx Whitestone橋（2006年）



b) 東京港臨海大橋（2012年）

16

4. 疲労設計

17

FHWAマニュアルにおける鋼床版の設計

AASHTO LRFD（荷重抵抗係数設計法）に基づき
以下3種類の限界状態に対して安全性を照査する

Strength Limit State （終局限界状態）

Service Limit State （使用限界状態）

Fatigue Limit State （疲労限界状態）

18

鋼床版橋梁の疲労設計

構造詳細は局部構造に対する照査結果により決定

↓

個々の橋梁に応じた構造詳細を決定する必要あり
全ての鋼床版橋梁に適用可能な構造ディテールの設定はない

↓

・構造詳細ごとに設計レベルや疲労強度等級を設定
・局部応力に対する疲労照査手法を整備しており、3次元FEM解析にて検証

19

設計レベル

			設計レベル 1	設計レベル 2	設計レベル 3
手法	実物大試験体による疲労試験		●		
手法	過去に疲労耐久性が確認された構造の流用		●		
手法	1次元 あるいは 2次元解析による応力照査			●	
手法	3次元FEM解析による応力照査				●
適用範囲	疲労限界状態に対する安全性照査	局部応力集中がない部位	●	●	●
適用範囲	疲労限界状態に対する安全性照査	局部応力集中がある部位	●		●
適用範囲	疲労限界状態に対する安全性照査	取替床版向け			●

20

レベル1設計

①実験により疲労耐久性が確認された構造詳細を流用（もしくは新たに実験を実施）

②流用にあたっては、形状や設計応力、製作時の品質が実験時と同等であることを確認する必要あり

③ユーロコードや道示では、レベル1設計で適用される標準化された構造詳細が示されているが、米国ではそのような構造詳細は確立していない

21

レベル2設計

①単純化された1次元もしくは2次元解析を使用

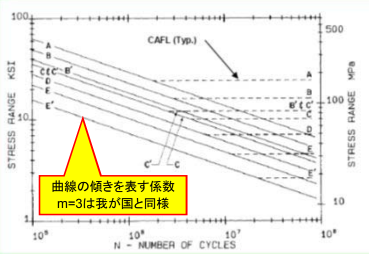
②公称応力のみを考慮し、局部応力集中は考慮しない

③従って、公称応力が定義できない箇所には適用不可（例えば、中間横リブもしくはダイヤフラム）

④評価は、疲労等級ごとに設定されたS-N曲線を使用

22

疲労設計のためのS－N曲線



97.5%非超過確率での曲線でA～E’等級までの8等級あり

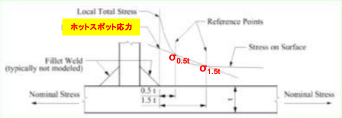
23

レベル3設計

①3次元FEM解析により、局部構造応力（σlss)を評価

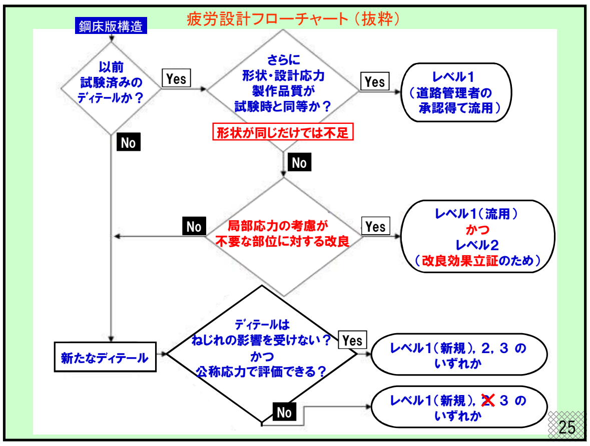
②溶接止端から0.5tと1.5t位置の表面応力から直線外挿したホットスポット応力（σhs)による評価方法もあり

$$\sigma hs=1.5\sigma_{1.5t}-0.5\sigma_{0.5t}$$

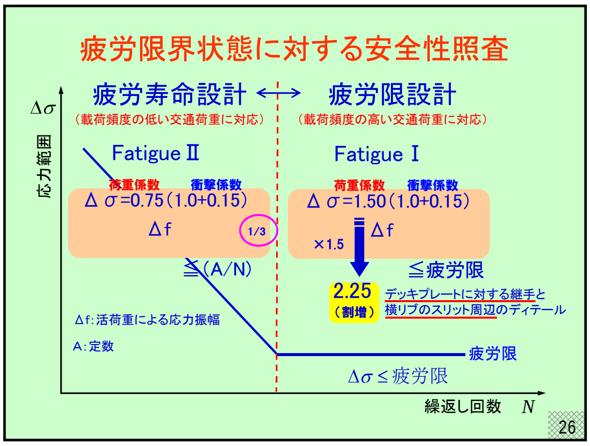


③ホットスポット応力を用いる場合は、C等級で評価（我が国のE等級に相当）

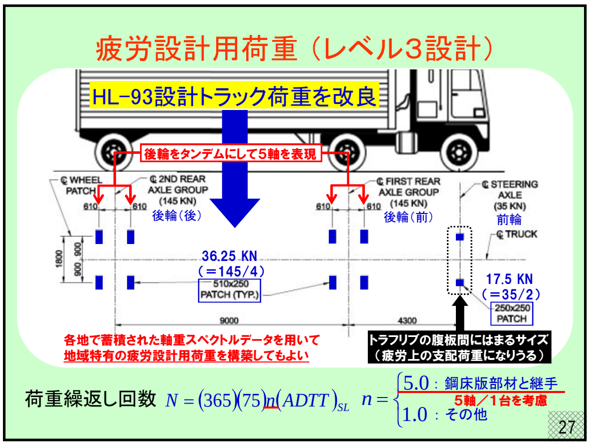
24



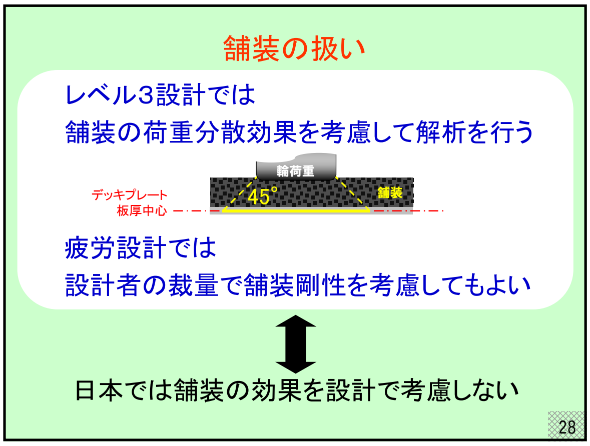
鋼床版構造
疲労設計フローチャート（抜粋）
以前
試験済みの
ディテールか？
Yes
さらに
形状・設計応力
製作品質が
試験時と同等か？
Yes
レベル1
（道路管理者の
承認得て流用）
形状が同じだけでは不足
No
No
No
局部応力の考慮が
不要な部位に対する改良
Yes
レベル1（流用）
かつ
レベル2
（改良効果立証のため）
ディテールは
ねじれの影響を受けない？
かつ
公称応力で評価できる？
Yes
新たなディテール
レベル1（新規），2，3 の
いずれか
No
レベル1（新規），3 の
いずれか
25



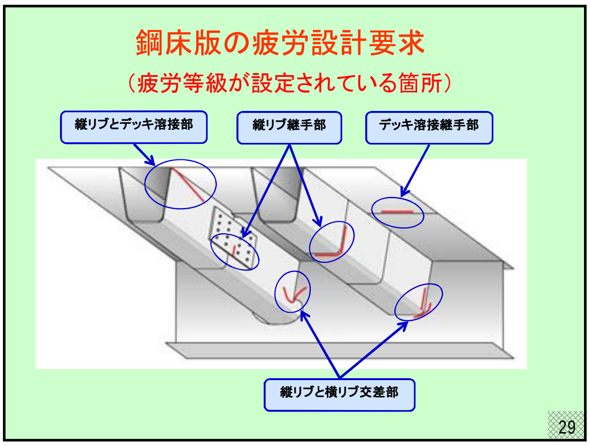
疲労限界状態に対する安全性照査
Δσ
応力範囲
疲労寿命設計
疲労限設計
（載荷頻度の低い交通荷重に対応）
（載荷頻度の高い交通荷重に対応）
Fatigue Ⅱ
Fatigue Ⅰ
荷重係数
衝撃係数
Δ σ=0.75（1.0+0.15）
Δ σ=1.50（1.0+0.15）
Δf
1/3
×1.5
Δf
≦(A/N)
≦疲労限
2.25
（割増）
デッキプレートに対する継手と
横リブのスリット周辺のディテール
Δf：活荷重による応力振幅
A：定数
疲労限
Δσ≤疲労限
繰返し回数 N
26



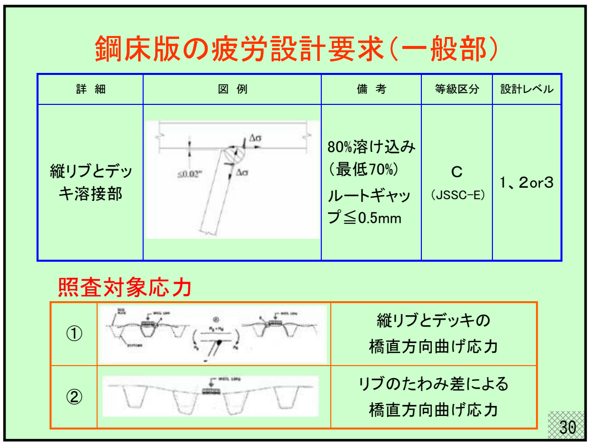
疲労設計用荷重（レベル3設計）
HL-93設計トラック荷重を改良
後輪をタンデムにして5軸を表現
℄ WHEEL PATCH
℄ 2ND REAR AXLE GROUP (145 KN)
後輪（後）
℄ FIRST REAR AXLE GROUP (145 KN)
後輪（前）
℄ STEERING AXLE (35 KN)
前輪
℄ TRUCK
36.25 KN
（＝145/4）
510x250 PATCH (TYP.)
17.5 KN
（＝35/2）
250x250 PATCH
9000
4300
各地で蓄積された軸重スペクトルデータを用いて
地域特有の疲労設計用荷重を構築してもよい
トラフリブの腹板間にはまるサイズ
（疲労上の支配荷重になりうる）
荷重繰返し回数 $N=(365)(75)n(ADTT)_{SL}$ $n=$
5.0：鋼床版部材と継手
5軸／1台を考慮
1.0：その他
27



舗装の扱い
レベル3設計では
舗装の荷重分散効果を考慮して解析を行う
デッキプレート
板厚中心
輪荷重
45°
舗装
疲労設計では
設計者の裁量で舗装剛性を考慮してもよい
日本では舗装の効果を設計で考慮しない
28

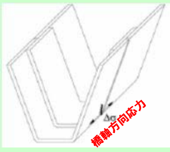
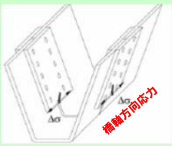


鋼床版の疲労設計要求
（疲労等級が設定されている箇所）
縦リブとデッキ溶接部
縦リブ継手部
デッキ溶接継手部
縦リブと横リブ交差部
29



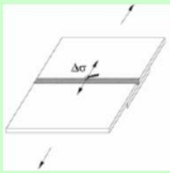
鋼床版の疲労設計要求（一般部）
詳 細
図 例
備 考
等級区分
設計レベル
縦リブとデッキ溶接部
80%溶け込み（最低70%）
ルートギャップ≦0.5mm
C
（JSSC-E）
1、2or3
照査対象応力
①
縦リブとデッキの
橋直方向曲げ応力
②
リブのたわみ差による
橋直方向曲げ応力
30

鋼床版の疲労設計要求（一般部）

詳 細	図 例	備 考	等級区分	設計レベル
縦リブ継手部（溶接継手）		裏当て材つきの片面開先溶接 ギャップ>リブ板厚	D (JSSC-F)	1、2or3
縦リブ継手部（高力ボルト）		高力ボルトによる接合	B (JSSC-C)	1、2or3

31

鋼床版の疲労設計要求（一般部）

詳 細	図 例	備 考	等級区分	設計レベル
デッキPL溶接部		裏当て材つきの橋軸方向および直角方向の片面開先溶接	D（面内応力） (JSSC-F) C（面外応力） (JSSC-E)	1、2or3

32

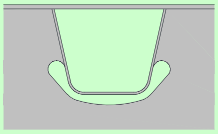
縦リブと横リブの交差部構造

①以下の2通りの構造あり

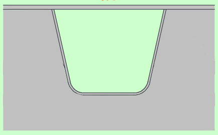
A：スリット構造

B：縦リブと横リブを全周溶接する構造

A構造



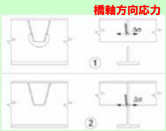
B構造



②公称応力での評価が困難であることから、レベル1設計もしくはレベル3設計を適用する必要あり

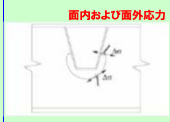
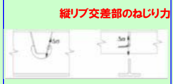
33

鋼床版の疲労設計要求（交差部）

詳 細	図 例	備 考	等級区分	設計レベル
縦リブと横リブ溶接部（縦リブ側）		溶接止端き裂	C (JSSC-E)	1、2or3
縦リブと横リブ溶接部（横リブ側）		溶接止端き裂	C (JSSC-E)	1or3

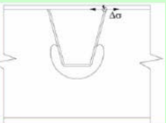
34

鋼床版の疲労設計要求（交差部）

詳 細	図 例	備 考	等級区分	設計レベル
横リブスリット部		母材縁端はスームーズ仕上げ 部材切断荒さは、AWS D1.5	A (JSSC-B)	1or3
スリット部の縦リブウェブ		止端き裂	C (JSSC-E)	1or3

35

鋼床版の疲労設計要求（交差部）

詳 細	図 例	備 考	区分	設計レベル
交差部での縦リブとデッキ溶接部		リブとデッキのすみ肉溶接ルート部のデッキ側母材	C (JSSC-E)	1or3

レベル3設計を適用できるとしているが、局部応力のC等級としての評価の妥当性を検証する必要あり

（今後の研究対象範囲）

36

5. 構造ディテール

一般的なプロポーション

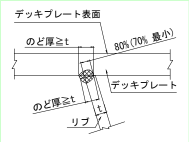
Detailing Dimension	Limit
デッキ厚	t_d > 14 mm (5/8 inch)
縦リブ厚	6 mm < t_r < 12 mm (1/4 < t_r < 1/2 inch)
縦リブ間隔（輪荷重直接載荷）	600 mm < s < 762 mm (24 < s < 30 inches)
縦リブ間隔（輪荷重直接載荷なし）	600 mm < s < 1000 mm (24 < s < 40 inches)
横リブ間隔	L < 6000 mm (20 ft)
縦リブと横リブの高さ比	h_{rib}/h_{FB} < 0.4
横リブウェブ厚	10 mm < t_{FB} < 20 mm (3/8 < t_{FB} < 3/4 inch)
スリットと縦リブの高さ比	h_{cutout}/h_{rib} > 0.33

デッキ最小板厚：14mm（日本：16mm）
縦リブ間隔が輪荷重の直接載荷の有無により異なる。
横リブ間隔は日本（2.5m）よりも長い。

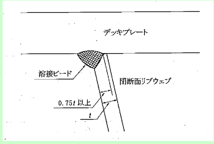
38

デッキと縦リブの溶接部

1. 溶込み量

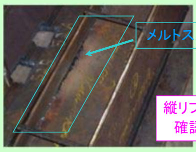


AASHTO
リブ板厚の80%



日本道路協会
リブ板厚の75%

2. メルトスルー：許容しない



縦リブを切断して
確認した状況

3. ルートギャップ
：0.5mm以内

縦リブと横桁の交差部

スリット部に生じる疲労き裂（日本の事例）

ねじりによる縦リブウェブの面外曲げが原因

40

交差部スリットの形状

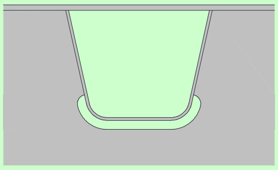
最適なスリット形状とするための留意点

- ・応力集中が小さくなるよう、**曲率半径**を大きくとる。
- ・**横リブのウェブ高**は、せん断と曲げによる面内応力を最小限に抑えるために、大きくする。
- ・**スリットの終端部**は、Uリブの高応力領域を避け、リブの回転に対して面外の柔軟性を有することが必要
- ・**スリットの終端部**は、過度のねじりを防ぐ必要がある。
- ・**バルクヘッド**は、溶接終端部で応力が集中するため、設けない。

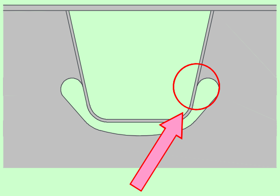
41

交差部スリットの比較

日本の現状



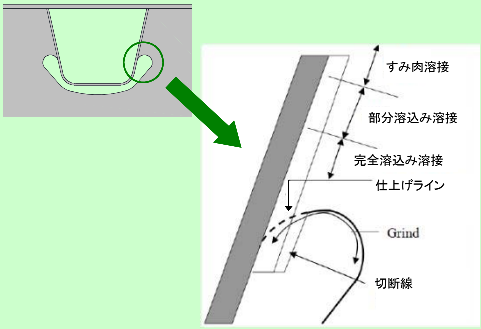
FHWAマニュアル



横桁ウェブを縦リブに擦り付けることで、縦リブの
面外曲げに対して応力集中を低減

42

スリット終端部のディテール

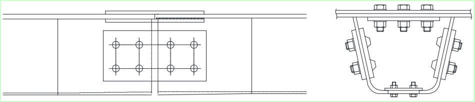


擦り付けることで、縦リブウェブの応力集中を低減

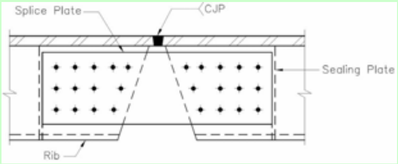
43

縦リブの突合せ継手部

日本



アメリカ

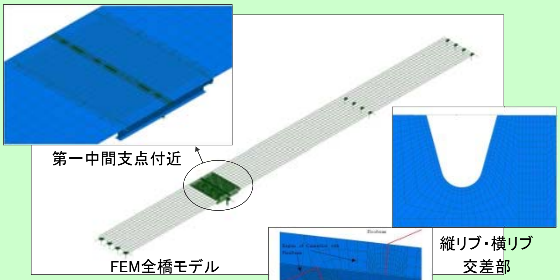


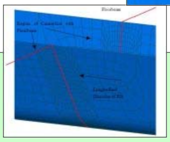
44

6. 疲労設計事例

45

FEMモデルの構築

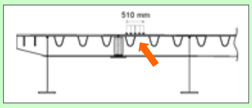


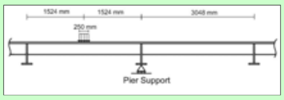


・最小要素サイズは板厚
・溶接ビードはモデル化しない
・舗装による荷重分散なし

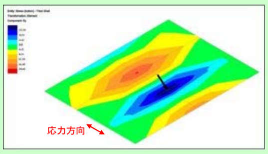
46

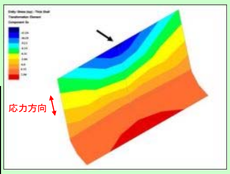
デッキプレートと縦リブの溶接





荷重載荷位置





解析結果

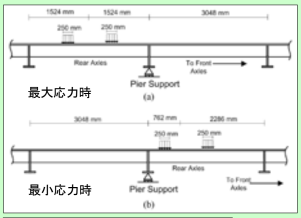
単位：Mpa

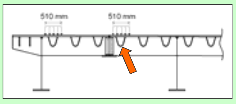
	解析結果 Δf	照査応力	強度等級	疲労限 強度
デッキ	21.6	55.9	C	69.0
リブ	13.1	33.9	C	69.0

照査応力＝2.25×（1.15×Δf）

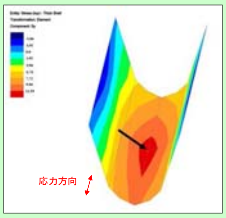
47

縦リブの継手





荷重載荷位置



解析結果

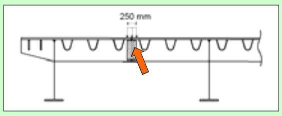
単位：Mpa

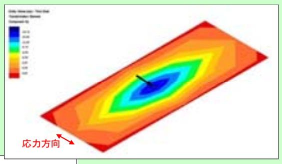
解析結果 Δf	照査応力	強度等級	疲労限 強度
17.7	34.3	D	48.0

Δf＝12.97-（-4.7）＝17.67Mpa
照査応力＝1.5×（1.15×Δf）

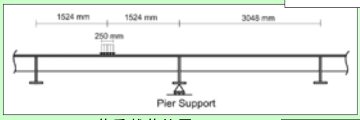
48

デッキプレートの継手





解析結果



荷重載荷位置

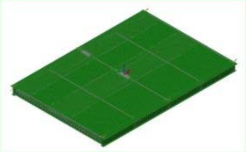
単位：Mpa

解析結果 Δf	照査応力	強度等級	疲労限強度
15.4	40.0	C	69.0

照査応力＝2.25×（1.15×Δf）

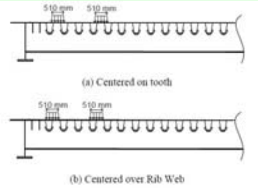
49

縦リブ横リブ交差部

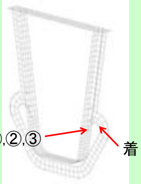


解析モデル（4パネル）

設計寿命75年
ADTT：485台
衝撃係数：1.15
荷重係数：0.75



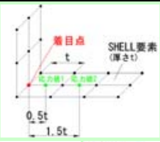
橋直方向荷重載荷位置

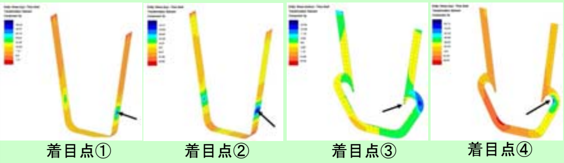


着目点①,②,③
着目点④

50

疲労照査結果





着目点①　着目点②　着目点③　着目点④

等価応力範囲を用いた疲労照査結果

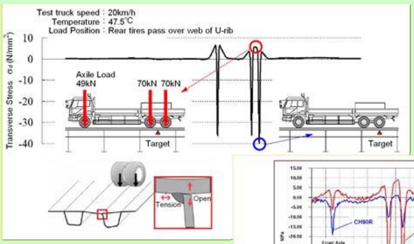
着目点	着目応力	解析結果(HSS) σ_r(MPa)	照査応力 $0.75\times1.15\times\Delta\sigma_r$	疲労強度等級（AASHTO）	基本疲労強度（MPa）	判定
①	縦リブ側橋軸方向応力	−44.75	38.6	C	47.7	OK
②	縦リブ側鉛直方向応力	55.3	47.7	C	47.7	OK
③	横リブ側差最大応力	20.77	17.9	C	47.7	OK
④	縁部横断方向応力	75.7	65.3	A	85.2	OK

51

7. その他

52

（1）実橋計測事例（4.5節）



↓本マニュアル

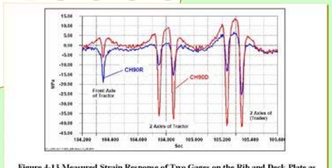


Figure 4-13 Measured Strain Response of Two Gages on the Rib and Deck Plate as Random HS Type Truck Passed (Note that Each Axle Produces an Individual Stress Cycle).

↑我が国での計測結果

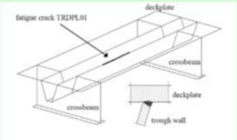
デッキプレートとUリブ
溶接部の橋直方向応力

これらの知見は、我が国での知見と概ね一致している。

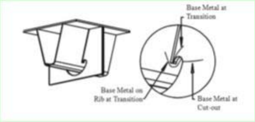
（2）維持管理（8章）

- 鋼床版は、薄いデッキプレートの下側に数多くのリブが溶接されているため、点検は他の形式の橋梁と比べて独特。

- 閉断面リブの場合は溶接のルート部を見ることができない。
- ルート部から発生するき裂には、UTが有力な方法となる。
- どのような継手のディテールが疑わしいのか理解することが重要。



Uリブとデッキの溶接部のき裂



Uリブと横リブの交差部のき裂

・鋼床版橋梁 ⟶「舗装の損傷」と「鋼材の疲労き裂」が問題。

デッキのき裂を示唆する舗装の劣化

舗装除去後にデッキのき裂を確認

➡ 日本でも同様の研究結果（国総研、橋建協：鋼部材の耐久性向上策に関する共同研究－実態調査に基づく鋼床版の点検手法に関する検討－、国総研資料第471号、2008.8）

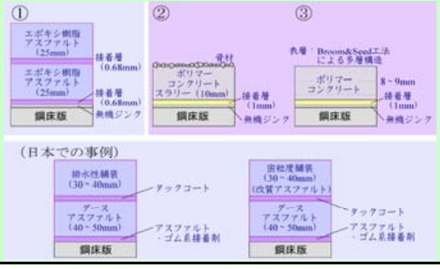
・鋼材の疲労き裂に対する対処は、橋梁のリダンダンシーやライフサイクルコスト を分析した上で決定する。

＜補修方法＞（日本と同様）
・ストップホールや当て板施工は各種の損傷に適用できる。
・デッキに発生したき裂に対しては、き裂の発生したデッキ部を切り取って厚いデッキプレートに取り替えるという方法や、鋼繊維補強コンクリートにより剛性を増す方法もある。

（3）舗装（9章）

瀝青材料系 ―― ①マスチックアスファルト

ポリマー樹脂系 ―― ②エポキシ樹脂アスファルト
③ポリマー樹脂コンクリート
④多層ポリマー樹脂コンクリート



（4）実験・試験

ｉ）鋼床版継手部の試験（10.2節）

小型の試験体を用いる場合の留意点

①作用力や境界条件は実橋と同様とする。実橋よりも荷重の振幅を大きくしてもよいが、それによって損傷モードがかわるようなことがあってはならない。
②試験体の製作は実橋の作り手と同じでなければならない。
③既往の確立されている基準と比較ができるように、計測機器を設置しなければならない。
④統計的に十分な数の試験を実施しなければならない。
⑤小型試験体による検証は、実寸の試験体の代わりとなりうるならば使用できる。
⑥計測されたひずみや変位は、FEM解析結果と比較するべきである。大きな矛盾（例えば10%以上）については検討し、原因を正すか、結果が正しいことを証明しなければならない。

57

ⅱ）実物大模型（10.4節）

Whitestone Bridgeの実大試験

アメリカで実施された最近の実大試験(デッキ取り換えが主)

Project	Testing Location	Date
Verrazano Narrows Bridge Redecking	Lehigh University	ongoing
California Dept. of Transportation	University of California San Diego	2007
Bronx Whitestone Bridge Redecking	Lehigh University	2001
Williamsburg Bridge Redecking	Lehigh University	1995, 1998

58

8．今後の橋建協での取り組み

59

日本橋梁建設協会の活動

疲労設計手法の確立に向けた当委員会の活動

■疲労照査方法の提案
・デッキプレートと縦リブ溶接部
・縦リブ横リブ交差部
・垂直補剛材上端部

■構造詳細の提案
・高耐久性鋼床版

60