

# 講習と現地実習 〔道路橋の維持管理〕

-鋼橋の疲労について-



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  
CAESAR

Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research

上席研究員 村越 潤

## 疲労とは？

外力による応力の繰返し



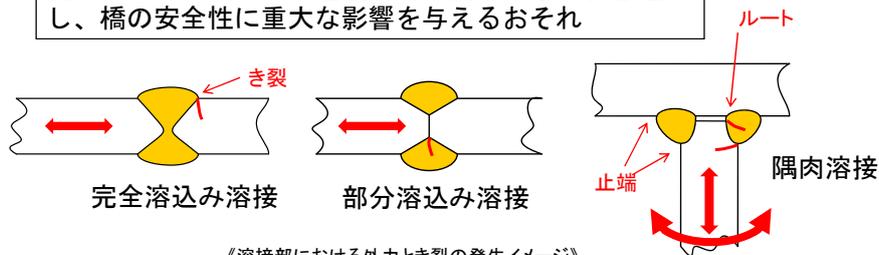
応力集中部からき裂が発生

- ・ 構造的な応力集中部
- ・ 溶接形状や溶接欠陥等に起因する応力集中部

1回作用するだけでは構造物に影響を与えない小さな荷重でも、何十万回、何百万回繰返し作用することにより、き裂の発生につながる



発生部位によっては、進展すると脆性破壊を引き起こし、橋の安全性に重大な影響を与えるおそれ

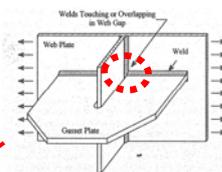


《溶接部における外力とき裂の発生イメージ》

## 重大損傷につながる場合がある

### I-794 Hoan Bridge (米国)

形式: 3径間連続 I 桁橋  
橋長: 195m (支間長65m)  
竣工: 1972年、1977年開通 (供用後23年)  
概要: 2000年12月、横つなぎ部材を取り付けるガセット溶接部からき裂が進展し、3主桁のうち2主桁を破断、架替えに至る。



き裂の起点

出典: HOAN BRIDGE FORENSIC INVESTIGATION  
FAILURE ANALYSIS FINAL REPORT, June 2001, Wisconsin DOT & FHWA

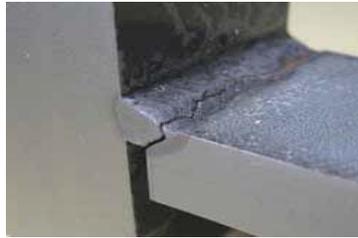
## 疲労の発生要因

- 直接的には応力の集中と繰返しであるが、損傷要因は様々
- H14道示までは、疲労については一般に未考慮。建設当時の知見では、設計・製作上の配慮が必ずしも十分でなかった事例がある。

- ・**荷重要因**: 大型車両の増大(重量、台数)  
風や車両走行に伴う振動現象  
(鋼部材では一般に耐久性は作用応力の3乗に反比例)
- ・**設計要因**:
  - 不適切な構造ディテールの採用(応力集中)
  - モデル化と実構造との違い(二次応力)
- ・**製作・施工要因**:
  - 製作誤差、溶接品質の不良に伴う応力集中
- ・**維持管理要因**:
  - 腐食・劣化に伴う支承等の機能低下

## 溶接品質の影響

溶接品質は、き裂の発生に多大な影響を与える場合がある。  
(溶接欠陥は疲労強度を著しく低下させる。)



溶接割れ

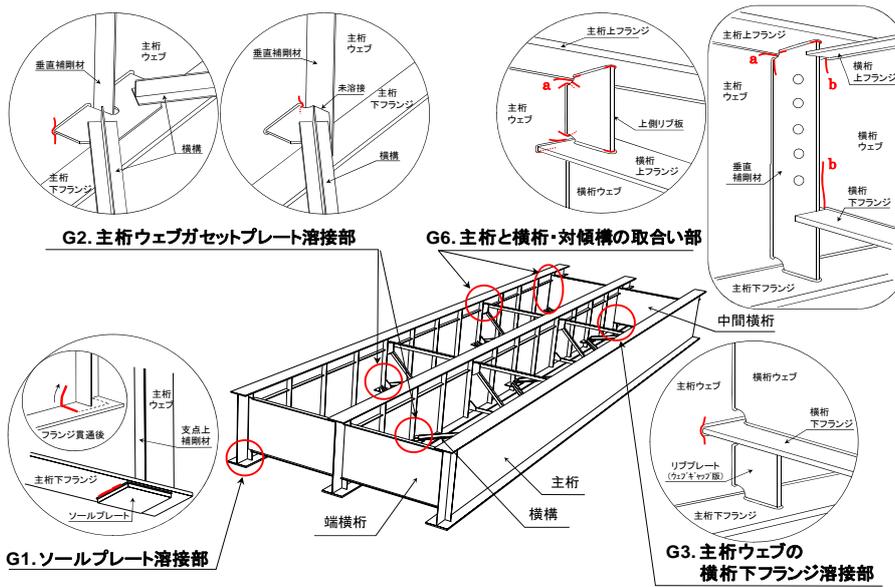


アンダーカット



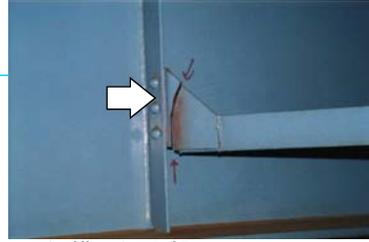
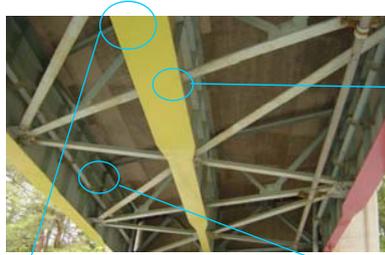
不溶着  
(I桁下フランジの板継溶接の不溶着からき裂が進展)

## 損傷の発生部位は？ - I桁橋の主な損傷部位 -



## 主桁と横部材の接合部の損傷事例

モデル化と実構造の違いや不適切なディテールが主要因であることが多い。



対傾構の継手部



主桁と横桁交差部のウェブギャップ板

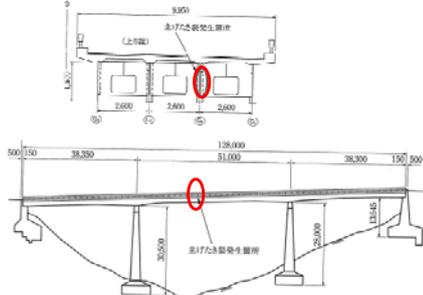
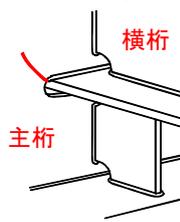


垂直補剛材と上げた上フランジの継手部

## 主桁と横げた接合部の損傷事例

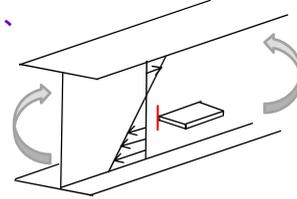
重交通路線において、疲労上望ましくないディテール(横桁フランジが主桁を貫通する継手)から、主桁破断につながるおそれのあるき裂が発生。

形式: 3径間連続非合成鋼 I 桁橋  
(S39道示、TL20)  
橋長: 38m+51m+38m  
竣工: 1972年(供用後34年)  
交通量: 約3万台/日 大型車混入率約45%  
概要: 2006年10月、定期点検時に主桁ウェブの横桁取付け部からの約1.1mのき裂を発見。交通止め、当て板等により応急復旧。



## 主桁の溶接継手の疲労強度

- 現行の疲労設計では、継手形状や止端仕上げにより、溶接継手の疲労強度等級を設定。
- 疲労強度の相対的に低いH、H'等級の継手は、使用しない方が良い継手とされている。
- 各種要因が複雑に影響するため、疲労耐久性は個別の橋・部位毎に異なる。



### 面外ガセット継手

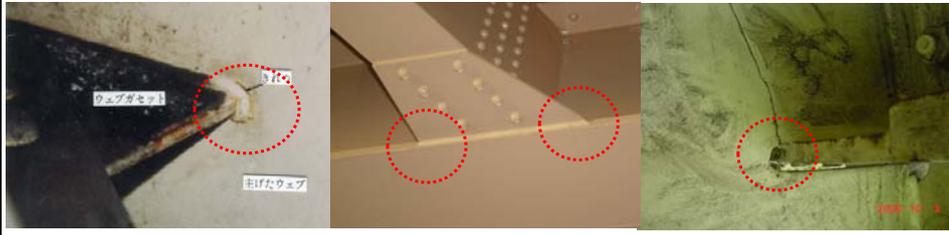
疲労強度等級  
G等級(50MPa) 寿命比1

### 面内ガセット継手

疲労強度等級  
H等級(40MPa) 約1/2

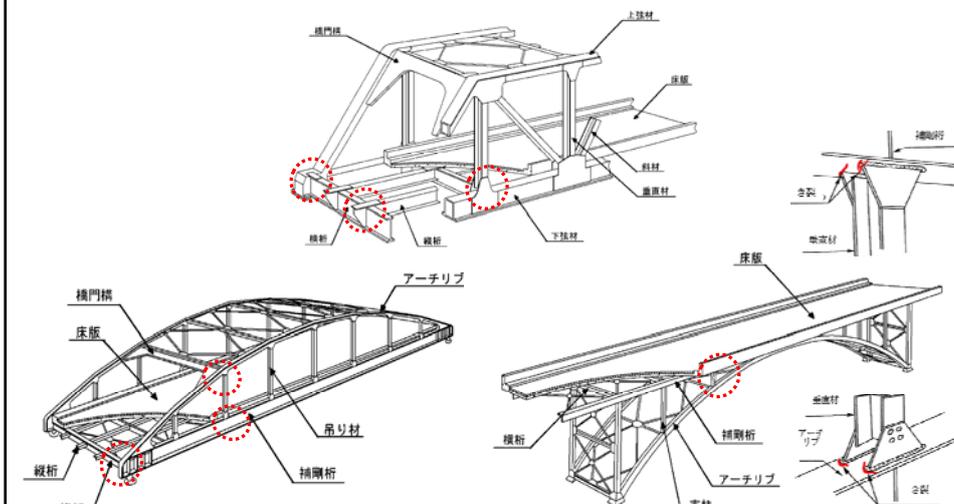
### 面外ガセット継手

(主桁にガセットを貫通)  
疲労強度等級  
H'等級(30MPa) 約1/4.6



## 損傷の発生部位は？ -トラス、アーチの主な損傷部位-

吊材もしくは斜材の主構との格点部付近では、自動車荷重の移動や風による振動に伴って複雑な応力状態となり、局部応力の程度によっては、疲労耐久性上厳しい条件となる場合がある。



## 吊材上下端接合部の損傷事例

活荷重載荷時の床組とアーチリブ間の相対的な挙動により、短吊材の接合部にき裂が発生。

形式：中路式鋼アーチ橋 (S39道示、TL20)  
 橋長：94m  
 竣工：1970年（供用後37年）  
 交通量：大型車72台/日  
 概要：2007年11月、点検時にき裂を発見、大型車通行止め、一般車片側通行規制。  
 アーチリブと部材長の短い吊材の格点部からの疲労き裂が発生。



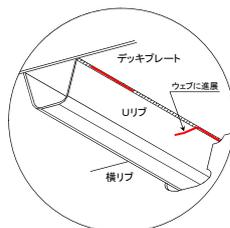
(道路側フランジ)



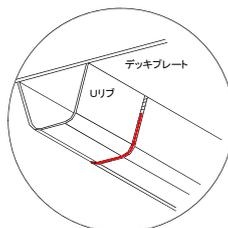
き裂発生箇所

## 損傷の発生部位は？ -鋼床版の主な損傷部位-

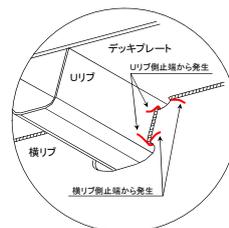
輪荷重走行位置直下周辺の溶接部のき裂に注意が必要



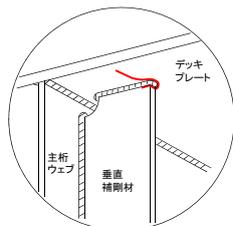
SD1. デッキとUリブの溶接部 (ビード進展)



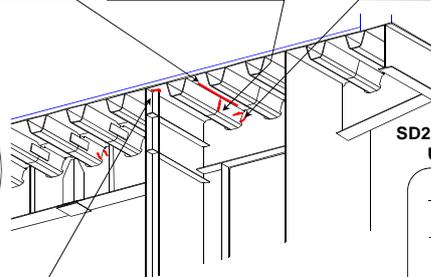
SD3. Uリブ現場溶接部



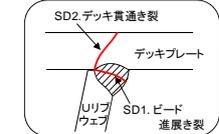
SD4. 横リブとUリブの交差部



SD4. デッキと垂直補剛材の溶接部



SD2. デッキとUリブの溶接部 (デッキ貫通)



SD2. デッキ貫通き裂

デッキプレート

SD1. ビード進展き裂

Uリブウェーブ



## 非破壊検査技術をどのように使うか？

### ○目視による点検・調査

- ・塗膜割れ、き裂を確認
- ・間接的変状を確認

(き裂進展に伴う、舗装損傷、き裂からの水、錆汁等の流出)



### ○診断、対策に見えない情報が必要となる場合があり、目的に応じて適切な方法を選択

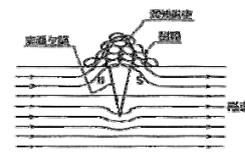
- ・塗膜を剥がさないと、き裂と特定できない場合がある。
- ・目視では発見困難なき裂がある。
- ・対策を考える上で、溶接内部の状態や挙動の確認が必要な場合がある。

## 磁粉探傷試験(MT)

### ○き裂の有無、表面長さを確認に適用

○きれつ部に磁粉(蛍光磁粉)を吹き付けた後、磁場を与えて、き裂部に生じた漏洩磁束に磁化した磁粉を吸着し、紫外線照射により損傷部(磁粉模様)を検出。

○表面き裂に限定される。未溶着部等があれば内部からのき裂が発生し、表面に現れない場合もある。



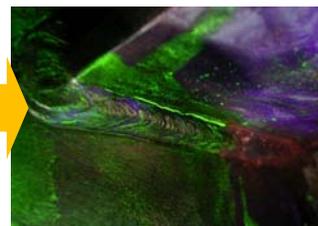
欠陥部における磁粉模様の形成



磁化および磁粉検査液の散布



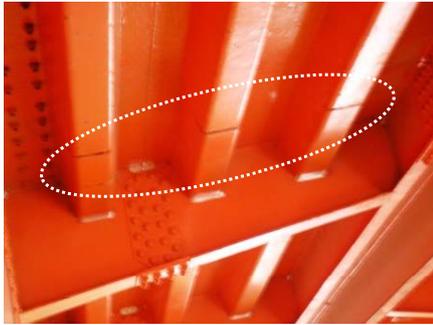
紫外線照射および磁粉模様観察



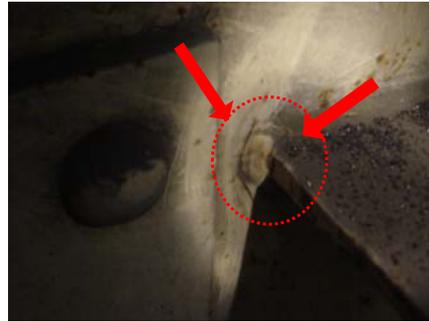
き裂指示模様

## き裂と疑われる塗膜割れの例

点検後に、磁粉探傷(MT)による確認が必要



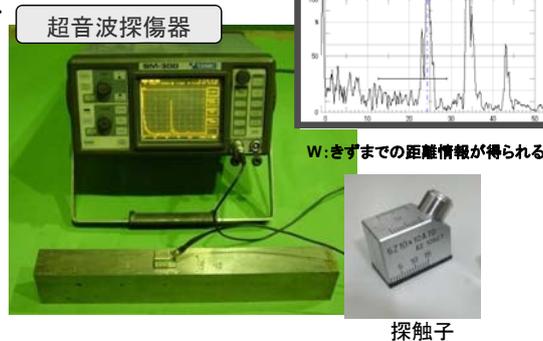
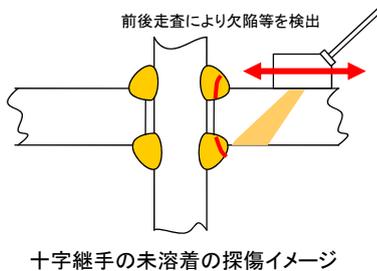
輪荷重下の鋼床版ブラケット部の突合せ継手  
⇒遠望目視では、き裂か否かの判断は難しい



主桁の横構ガセット継手  
⇒近接しても、塗膜を除去しないとき裂か否かの判断は難しい

## 超音波探傷試験(UT)

- 未溶着部の有無や、板組の推定に適用
- 鋼材表面に探触子をあて超音波を発信させ、欠陥等(境界面)からの反射エコーを受信して、位置、大きさ、深さを測定する手法
- UTによる検出性能、信頼性は必ずしも高いわけではない。
  - ・きれつ(きず)の位置、形状、表面性状によって検出精度がばらつく
  - ・結果判定に経験や技量が必要



# 目視困難なき裂へのUTの適用事例

**鋼床版橋梁**

輪荷重走行位置  
コア抜き

**デッキプレート表面**

き裂  
Uリブウェブ

溶接ルート部から、デッキ表面に向かって進展

**UT探傷**

波形例

屈折角70度の斜角探触子の例

SV波(横波) デッキプレート  
12mm  
探触子  
8mm (最も接近させた時に相対エコーが最大となる場合)

# 目視困難なき裂へのUTの適用事例

き裂深さの異なる模擬き裂を挿入した試験片による探傷結果 (1プロットが1試験片データ)

SV波(横波) デッキプレート  
12mm  
探触子  
8mm

**屈折角70度の斜角探触子**

エコー高さ(%)  
き裂深さ(mm)

2次クリーピング波(表面に沿う縦波) SV波(横波)  
12mm  
8mm 10mm

クリーピング波(鋼材表面に沿う縦波)

**クリーピング波探触子**

エコー高さ(%)  
き裂深さ(mm)

横波  
12mm  
8mm 約20mm

**屈折角約90度の斜角探触子**

エコー高さ(dB)  
き裂深さ(mm)

○超音波の種類や、探触子の種類により、探傷方法は様々

○目的と検出性能に留意して適用することが必要

- ・深さ推定のばらつきは大きい。
- ・鋼材表面(塗装、凹凸等)の影響を受ける場合がある。

⇒屈折角、反射波の強さが変化、き裂以外の反射源が影響するため、目的に応じたカスタマイズが必要

**[70度斜角]**  
一般的な探傷法。探傷角が浅いため、接近させても浅いき裂の検出は難しい。深いき裂の発見が可能。

**[クリーピング]**  
鋼材表面付近のきず検出に適用。同時に送信される横波によりデッキ表面きずのエコーとき裂との判別が難しい場合有り。

**[約90度(臨界屈折角)斜角]**  
浅いき裂の発見が可能。

## ひずみ等の挙動計測

- 車両走行、風等の外力に対する、部材のひずみ応答を計測  
⇒挙動把握による原因特定・効果的な対策の選定、対策前後の効果の確認
- 原因の推定、目的に対応した適切な調査手法、測定位置等の選定が重要  
(やみくもに測定しても、その後の診断、対策に役立たないことも)



計測装置の例



荷重車走行時の部材各部のひずみを計測

## 損傷部材の挙動計測事例

- 特定の部材の上下端接合部にき裂発生。
- 風や車両に対する部材の挙動を計測し、原因推定、対策に活用。

### <現地計測>

#### ○風による応答

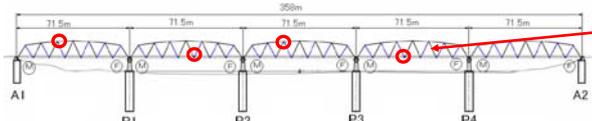
風速と振動モニタリングの結果、支間中央部の斜材に風速10~20m/s域で大きな面内振動（渦励振）が発生。

#### ○大型車通行による応答

荷重車走行試験の結果、斜材端部の発生応力は、渦励振時の応力と比較して十分小。



鋼下路式ワーレントラス  
(昭和40年竣工)



## 疲労への対応

- き裂を溶接部等の塗膜割れ等により見逃さず確認
  - ・目視が最も重要。その後、MTでき裂を特定
  - ・目的を明確にした上で、その他の非破壊検査を適宜適用
  
- 損傷要因は個別の橋・部位・溶接毎に多種多様  
個別のき裂毎に進展時の影響を評価、対処が重要
  - ・主桁・主構のき裂は部材破断につながる可能性
  - ・同一の構造部位には同種のき裂が発生する可能性⇒対応の優先度を見極めながら、橋全体の状態を確認