

1. 鋼構造物（鋼道路橋）の疲労

穴見 健吾

芝浦工業大学

鋼構造物（鋼道路橋）の疲労

芝浦工業大学
穴見 健吾

本日の話題

1. 疲労とは

溶接継手部の疲労の特徴

2. 溶接継手部の疲労強度等級

3. 鋼橋の疲労損傷事例

4. 疲労耐久性を向上させる方法

疲労破壊とは？

一度では壊れない力の繰返しで



き裂が発生し、進展して



最終的に脆性破壊や不安定破壊に至る現象

高サイクル疲労

10⁴回以上の繰返し

常時の使用環境下（降伏点以下の繰返し）

活荷重（自動車・鉄道車両・人？）・風

低サイクル疲労

10⁴回以下の繰返し

塑性域を超えるような力の繰返し

地震時

疲労現象を支配するパラメータ

作用

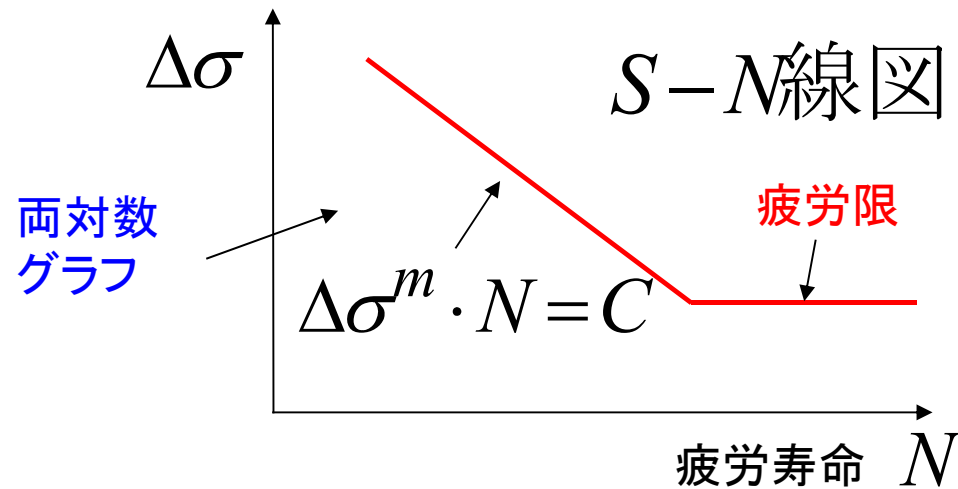
抵抗

応力範囲 $S(\Delta\sigma)$

VS

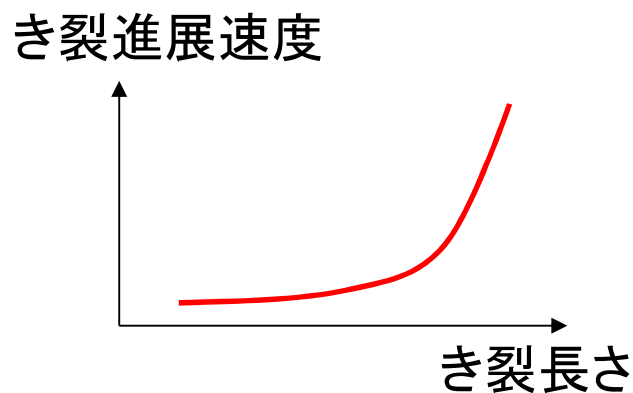
疲労強度 C

繰返し数 N



き裂の進展性状

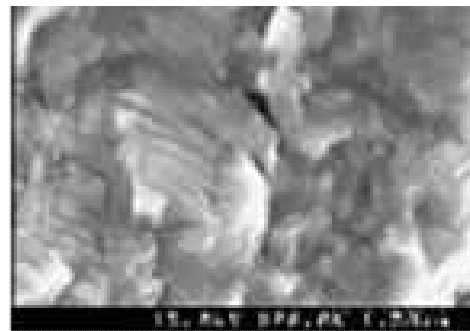
一般的には、き裂の進展に伴い、
加速度的に進展速度が大きくなる



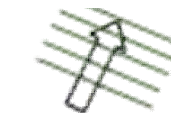
極力短いうちに発見・・・（対応も楽）
（き裂の発生位置に関する知識）

進展性を考慮したき裂への対処
（効率的な維持管理に向けて）

破面観察



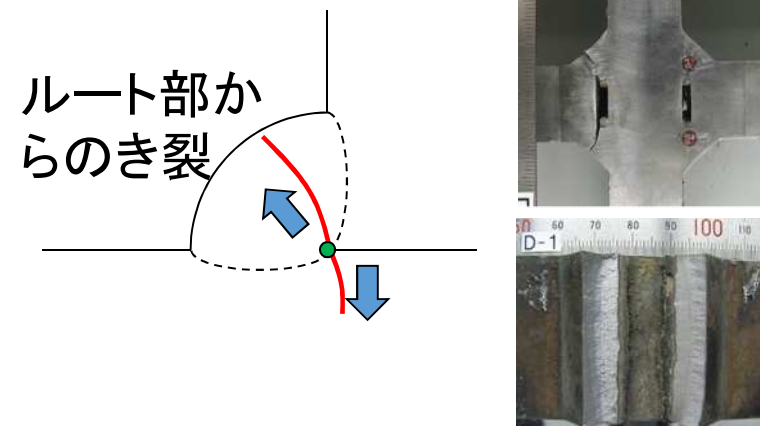
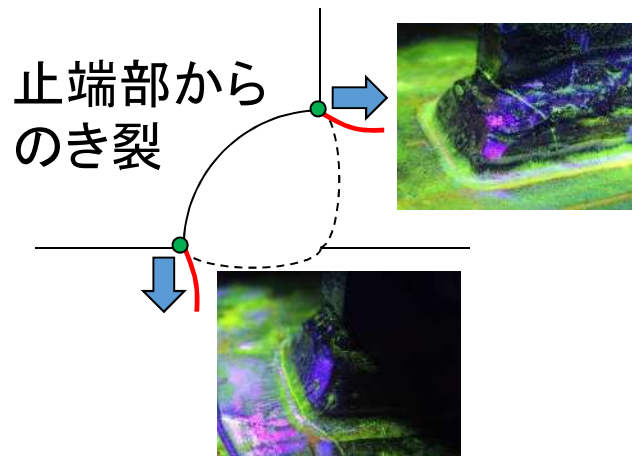
ストライエーション



き裂進展方向

溶接構造における疲労き裂

溶接部からの発生が多い

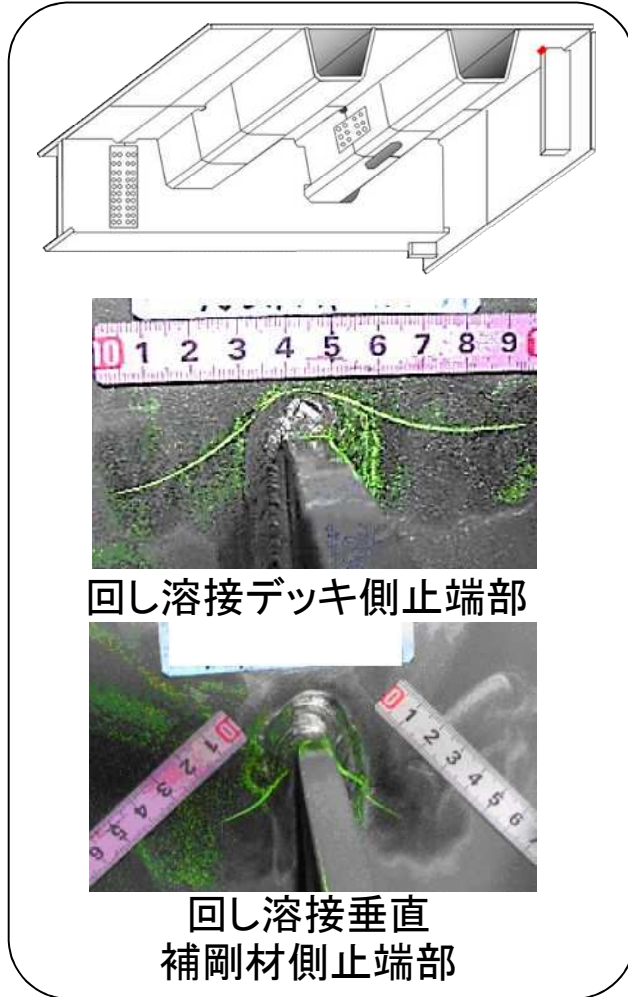


- 応力集中
- 溶接残留応力
- 溶接欠陥

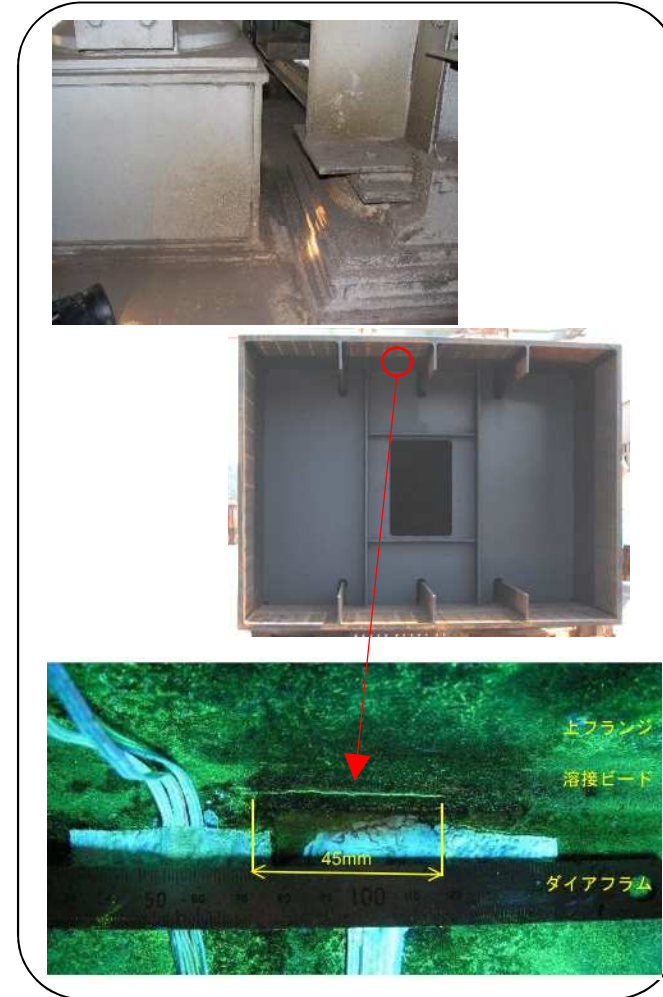


疲労耐久性が
母材部より低い

鋼床版垂直補剛材上端部



鋼製橋脚支点部直下 ダイヤフラム溶接部

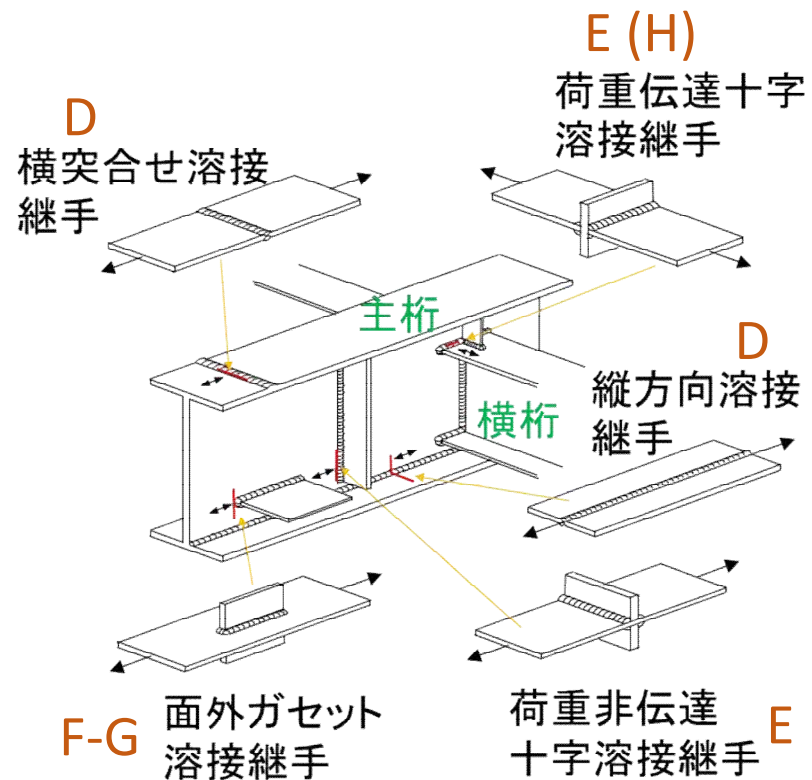
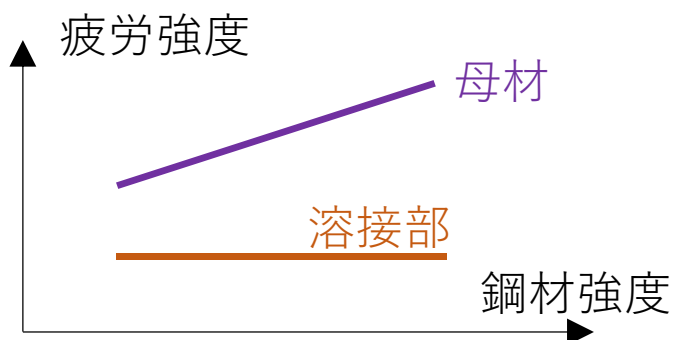


溶接部以外から発生するき裂

切断縁・ボルト（リベット）孔・腐食部の凹凸など

溶接部の疲労現象の特徴①

鋼材強度に依存しない

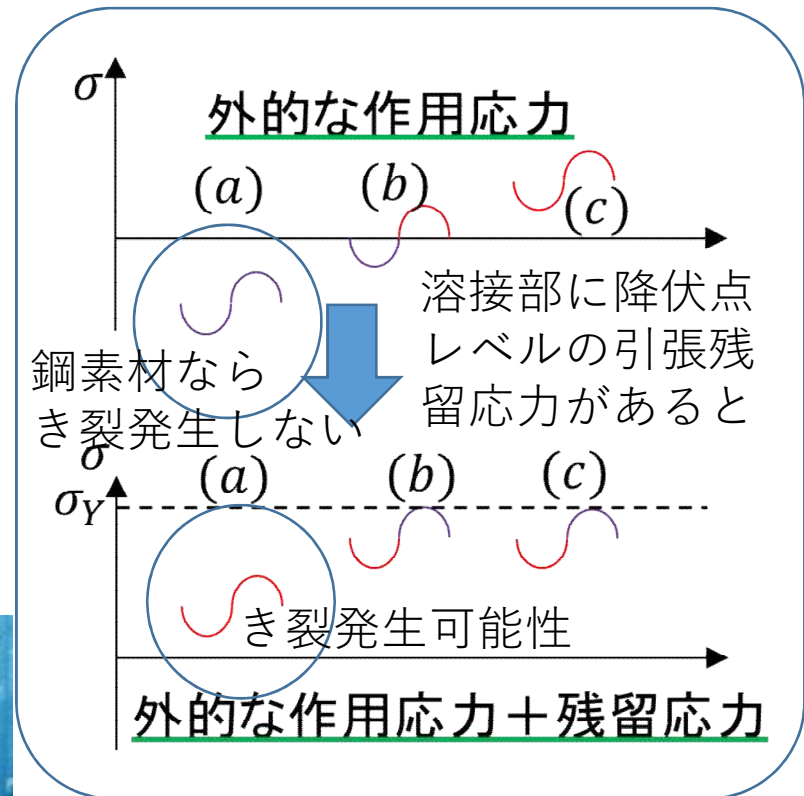
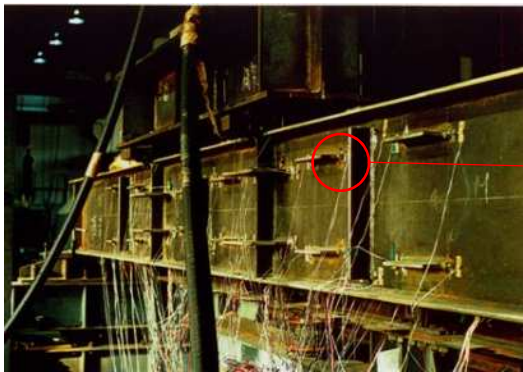
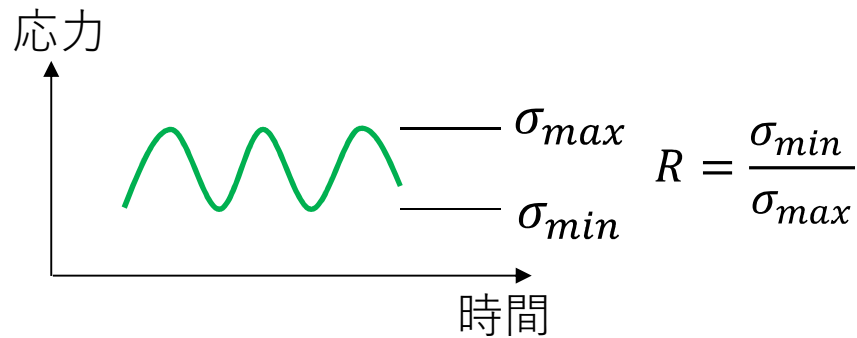


継手形式により (・寸法) により決まる

↑
継手形状と
作用応力方向

溶接部の疲労現象の特徴②

応力比の影響を受けにくい

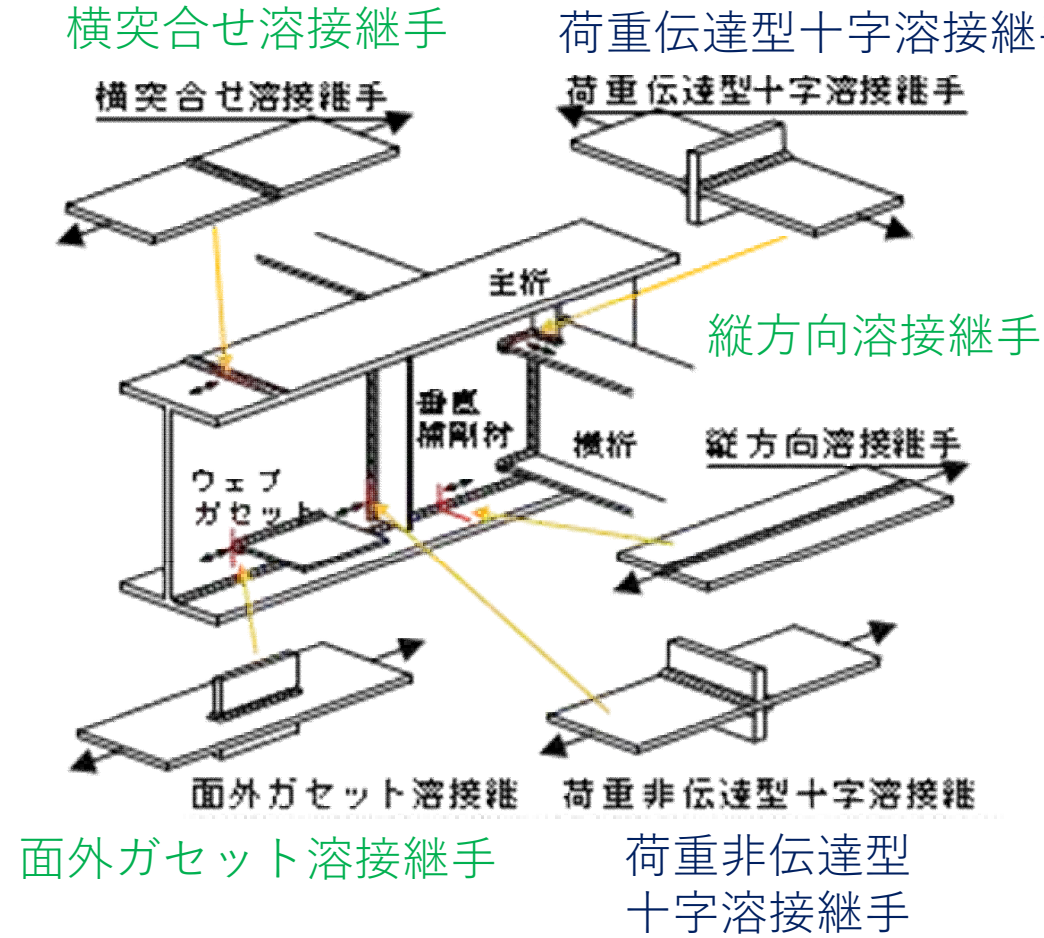


圧縮の繰返しでもき裂が発生

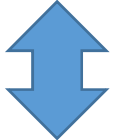
疲労強度等級とS-N線図

溶接継手部の疲労強度は鋼材強度非依存

継手形式に依存して分類



実構造物の溶接継手



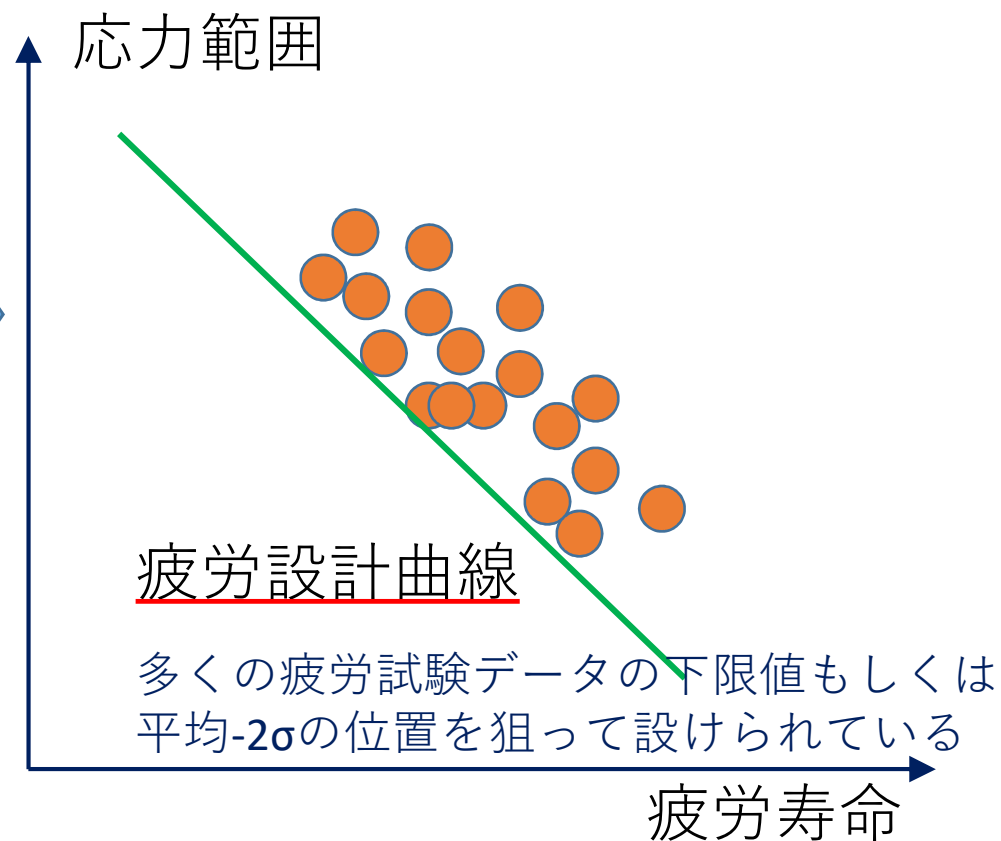
モデル化した基本継手試験体

引用：日本道路協会
鋼道路橋疲労設計指針

基本継手試験体の多くの疲労試験結果

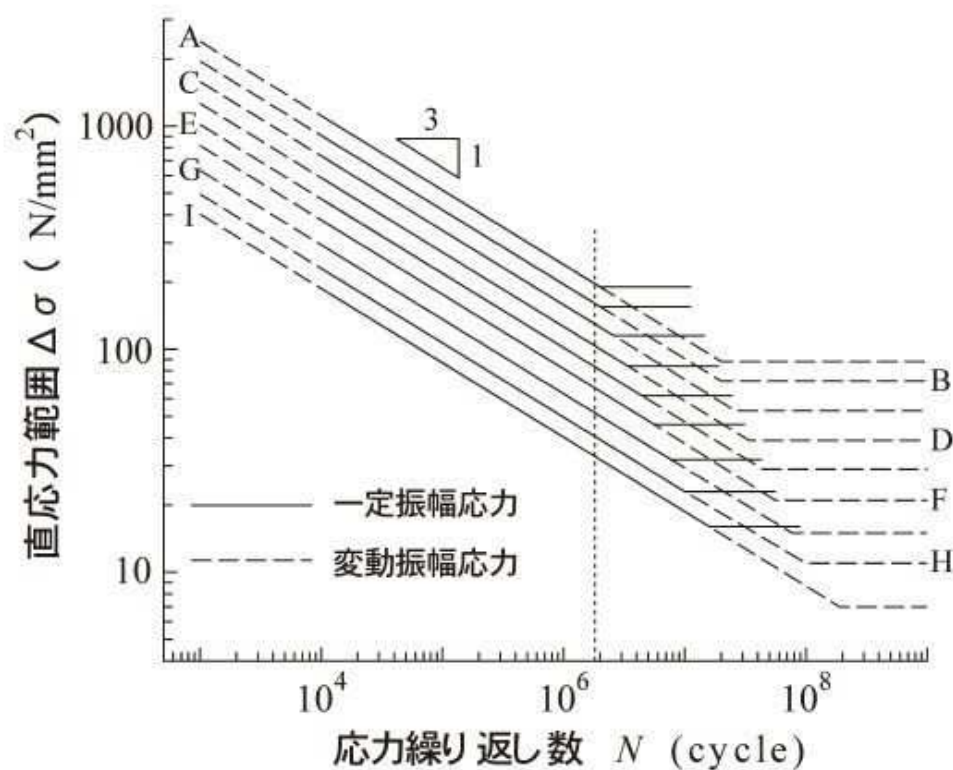


大型・実物大



応力集中・溶接残留応力
溶接欠陥等溶接品質等に関する考察

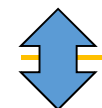
我が国の溶接構造の疲労設計曲線



鋼素材

応力集中・
表面粗さなど

ABC



溶接継手

溶接継手の形状
形式毎に分類

DEF

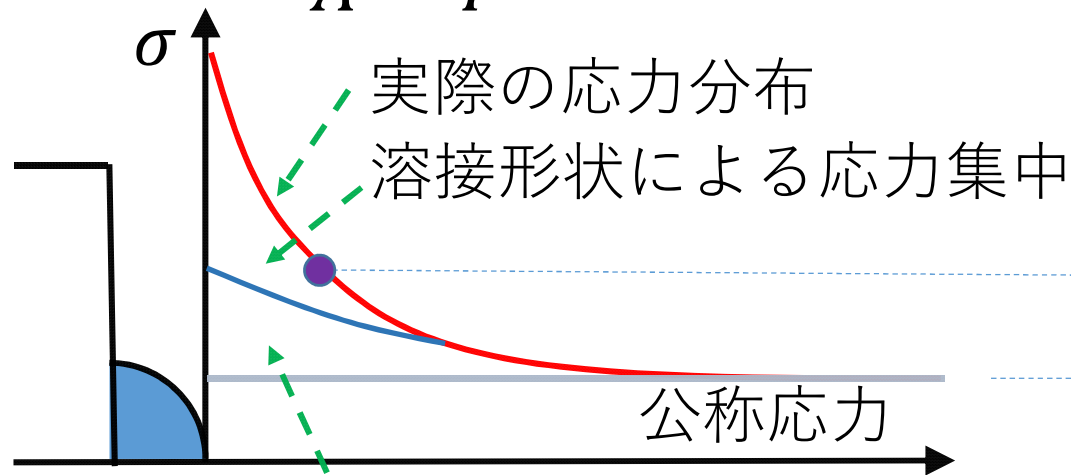
GHI

S-N線図の応力範囲について

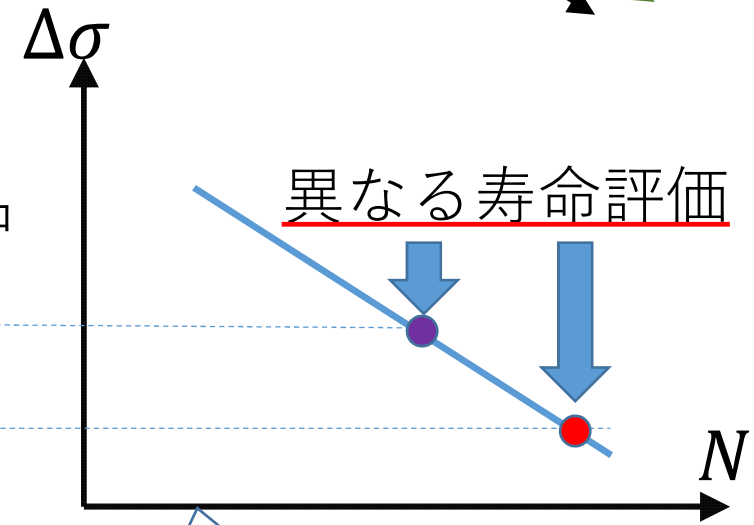
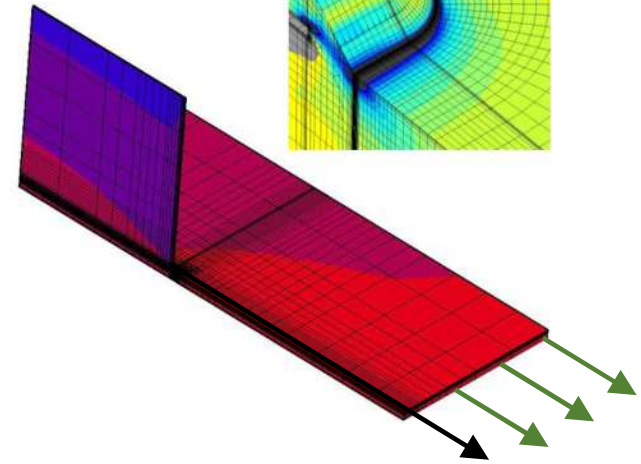
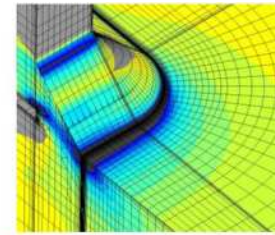
継手の疲労強度等級は一般に
公称応力範囲

をベースに定められている

$$\frac{\Delta P}{A}, \frac{\Delta M}{I} y \text{ など}$$



継手形状による応力集中
(構造的応力集中)



実橋測定・
FEM解析時の注意

一般に疲労設計は公称応力を用いる

詳細は次のセッションで！

鋼橋で疲労き裂が発生するのは、公称応力を定義できる部位だけではない

このような部位の疲労設計はどうする？



構造詳細による疲労設計を行う

局部応力を用いた疲労評価法

疲労き裂の発生点もしくはその近傍の応力を用いて疲労評価を行う



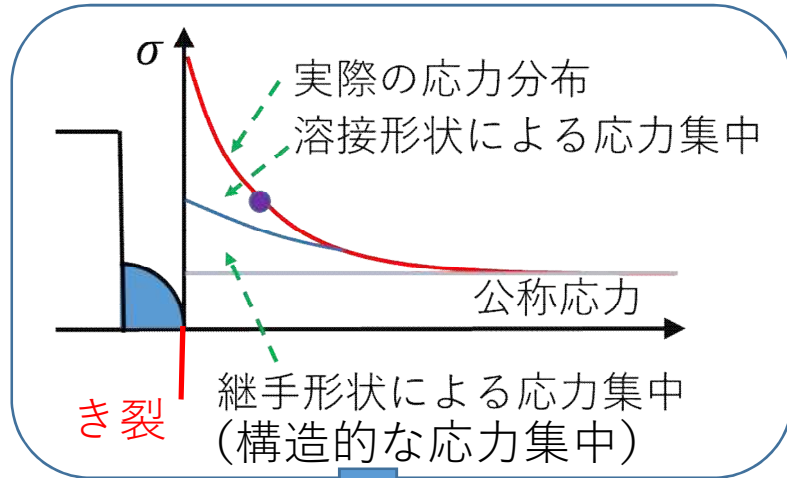
種々の方法が提案されている

ホットスポット応力法

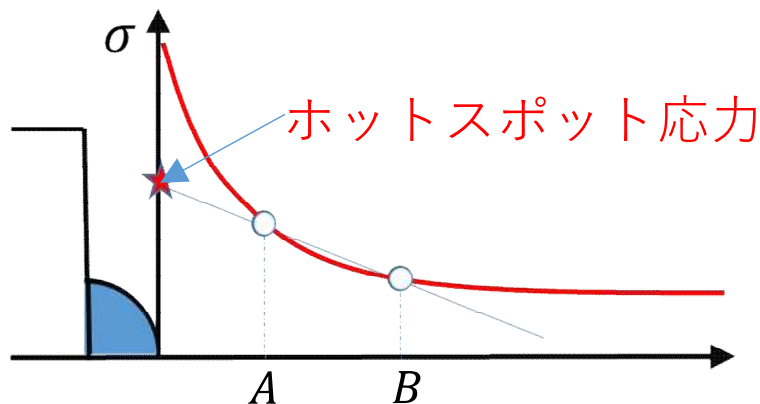
有効切欠き応力法

(エフェクティブノッチストレス法)

ホットスポット応力法



構造的な応力集中を含んだ
応力範囲で疲労強度を評価
する方法



外挿点などいろいろ提案が
あるが

JSSC (日本鋼構造協会)
「溶接構造物の疲労設計指
針同解説」では

$$A: 0.4T, B: 1.0T$$

T : 主板厚

が推奨

解析的にも実験的にも
求められる

エフェクティブノッチストレス法

き裂の発生点に仮想的な円孔を設ける

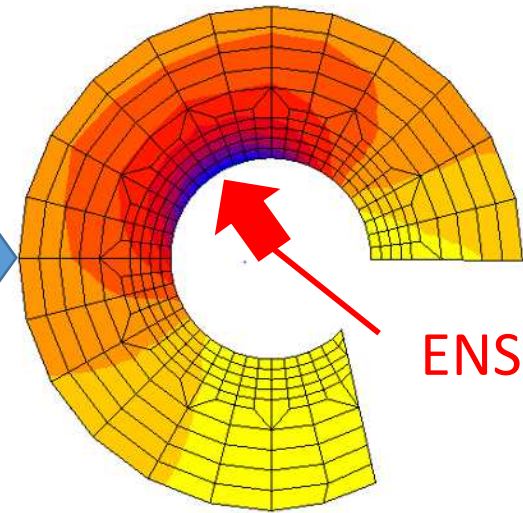
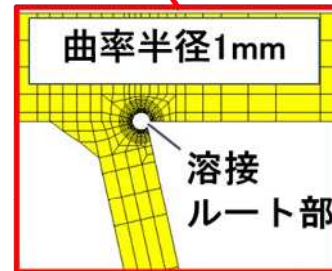
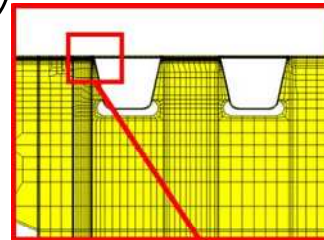
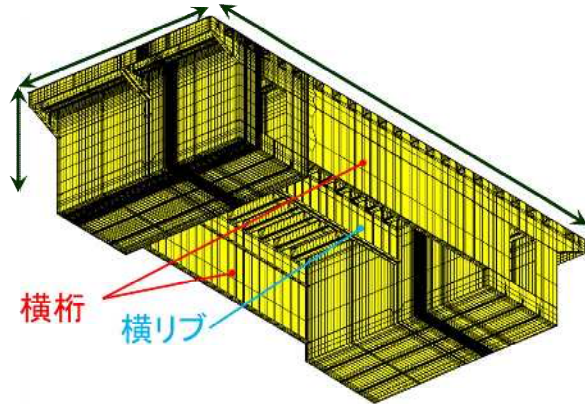
解析的な手法



円孔周辺の最大の最大主応力（範囲）を用いて評価する方法

止端部にもルート部にも適用可能

鋼床版デッキ閉断面リブ
溶接ルート部に適用



局部応力を用いた疲労評価法適用の注意

局部応力法を用いる場合には
公称応力を用いた疲労強度等級は使えません



それぞれの手法を用いた場合に確かめられた疲労強度等級

ホットスポット応力

解析的のモデル化にも注意

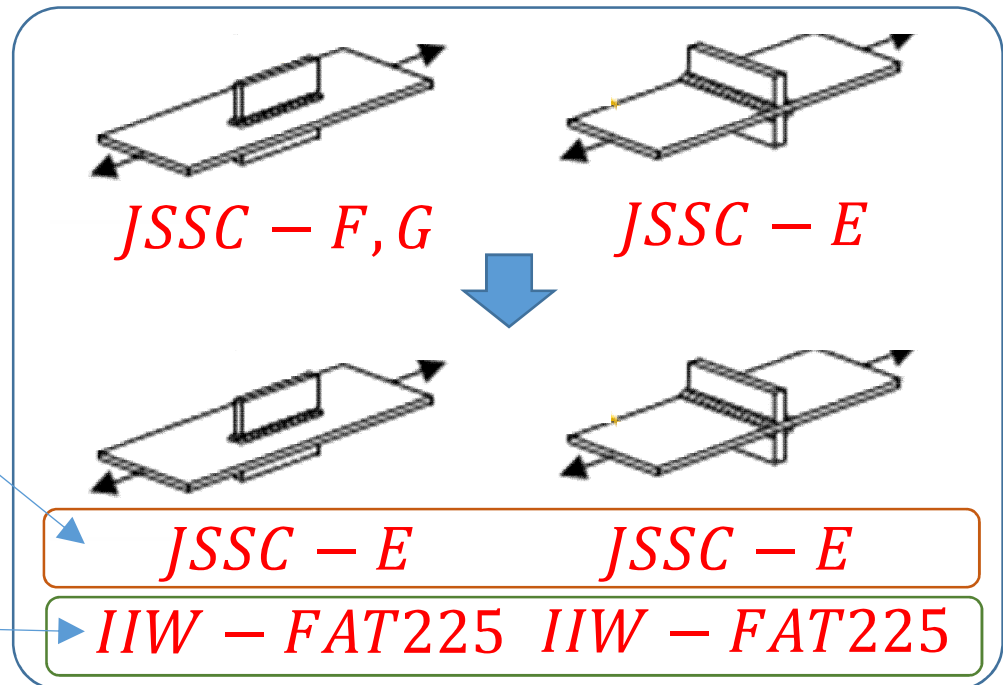
外挿点に $A: 0.4T, B: 1.0T$
を用いた場合

JSSC - E

ENS法

仮想円孔半径 $1mm$
を用いた場合

IIW - FAT225



疲労損傷の要因（鋼橋）

疲労強度が低い継手の採用

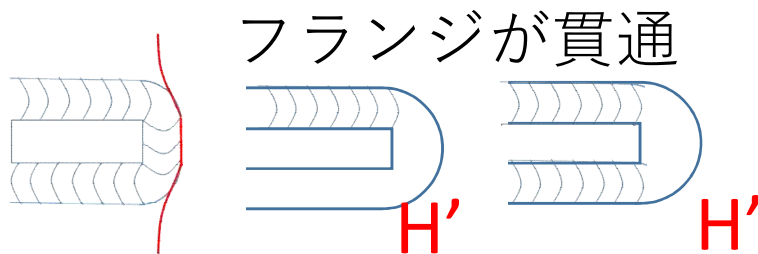
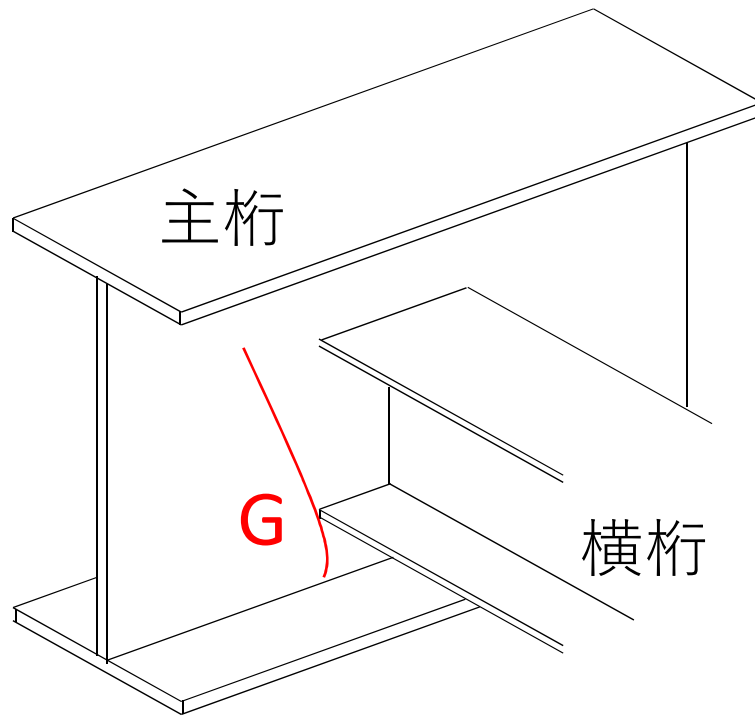
溶接欠陥

設計では考慮されない局部的な、または構造全体の挙動から発生する二次応力

予期せぬ振動（風・交通振動など）

一つだけでなく複合的に

疲労強度が低い継手の採用の例①



横桁フランジと主桁
ウェブの取り合い

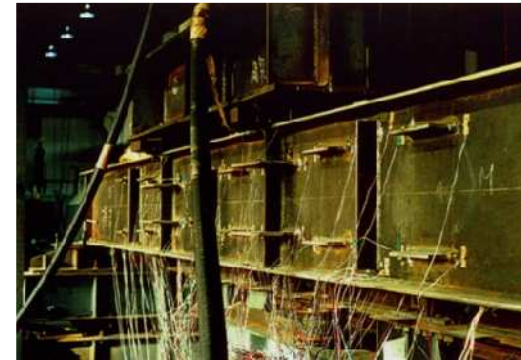
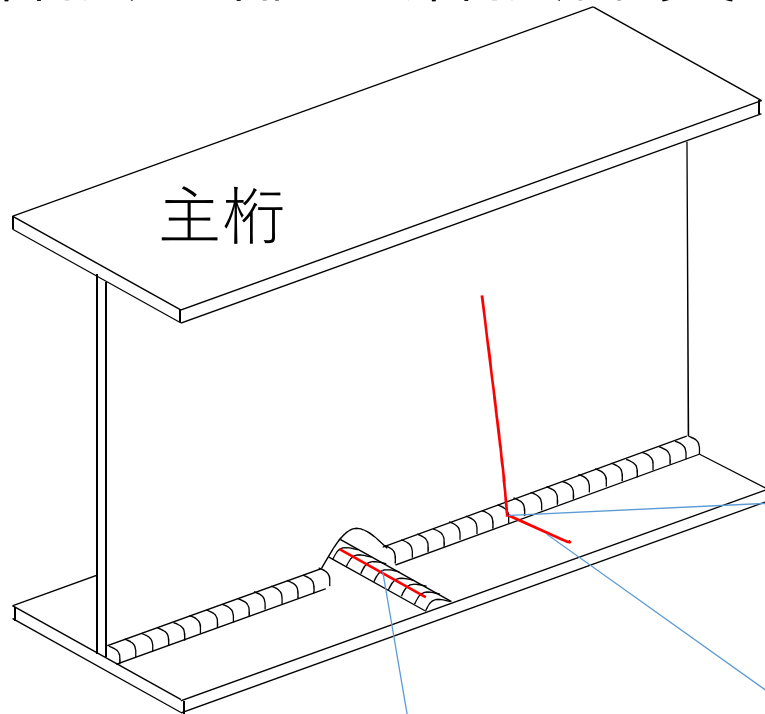
疲労設計の基本

疲労強度が極端に低い
継手は使用しない



鋼道路橋では使用しない
方がよい継手

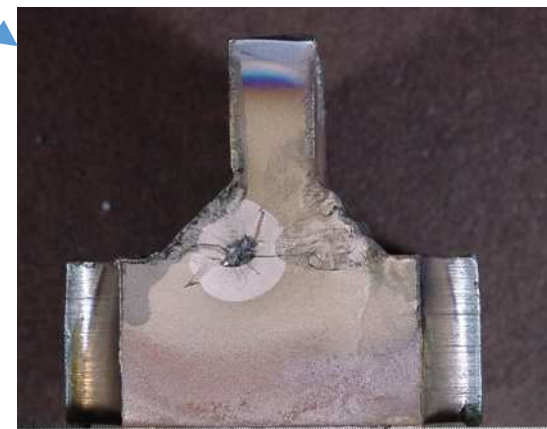
溶接欠陥・溶接品質①



横方向突合せ溶接継手



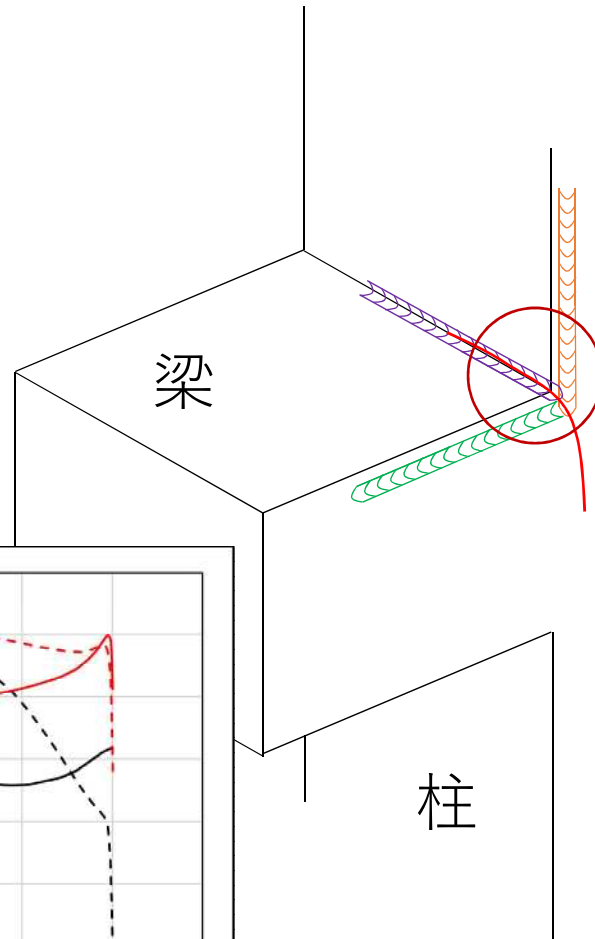
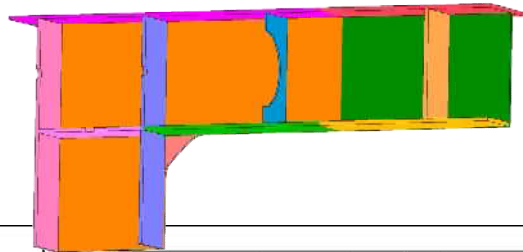
縦方向突合せ溶接継手



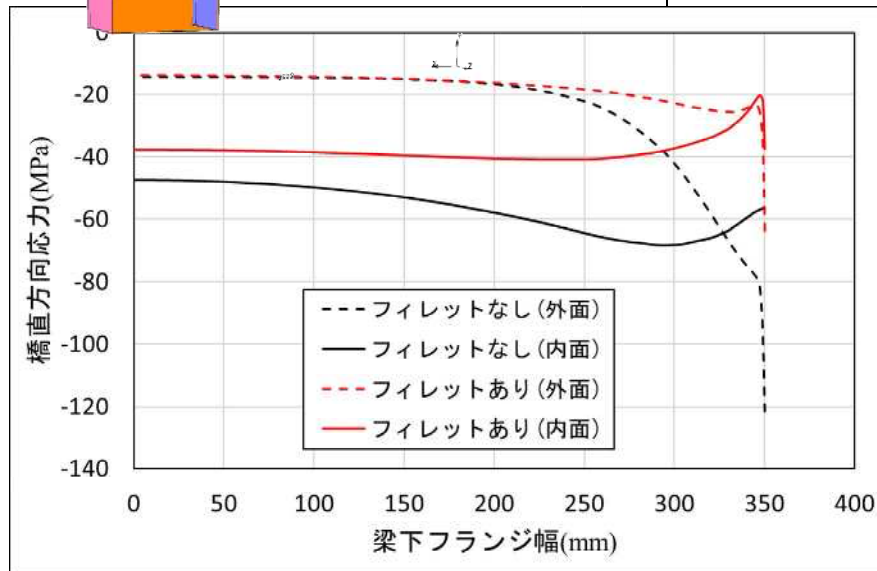
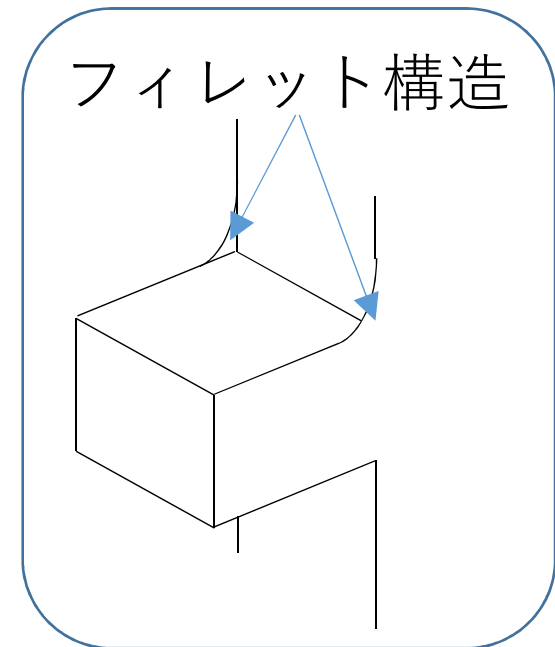
溶接欠陥・溶接品質②

鋼製橋脚隅角部

構造的に隅角部に
応力集中



溶接線交差部
板組が複雑

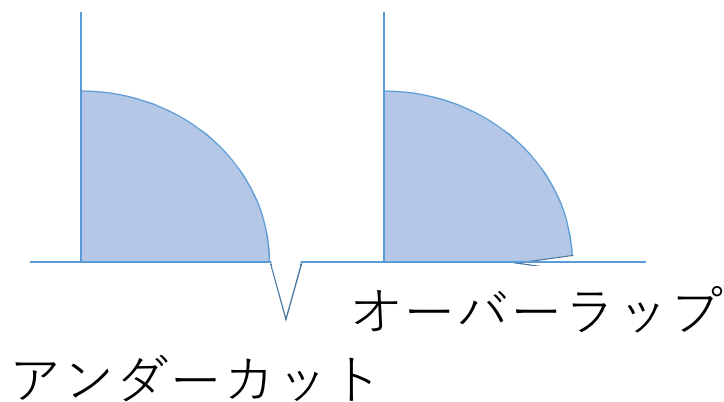


溶接欠陥・溶接品質③

内部欠陥

道路橋示方書
 $T/6 \text{ mm}$

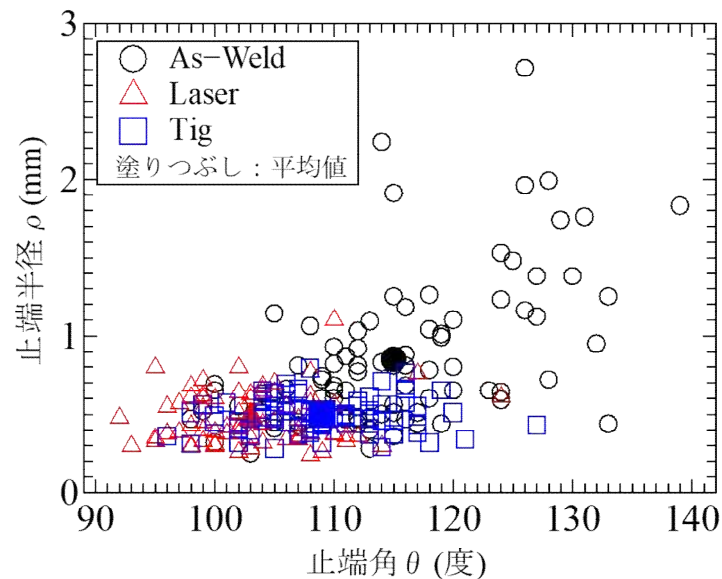
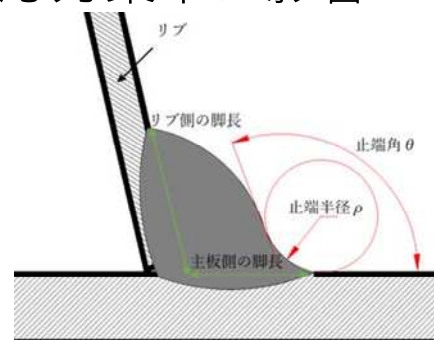
だけでなく
表面欠陥も



道路橋示方書
 0.3 mm

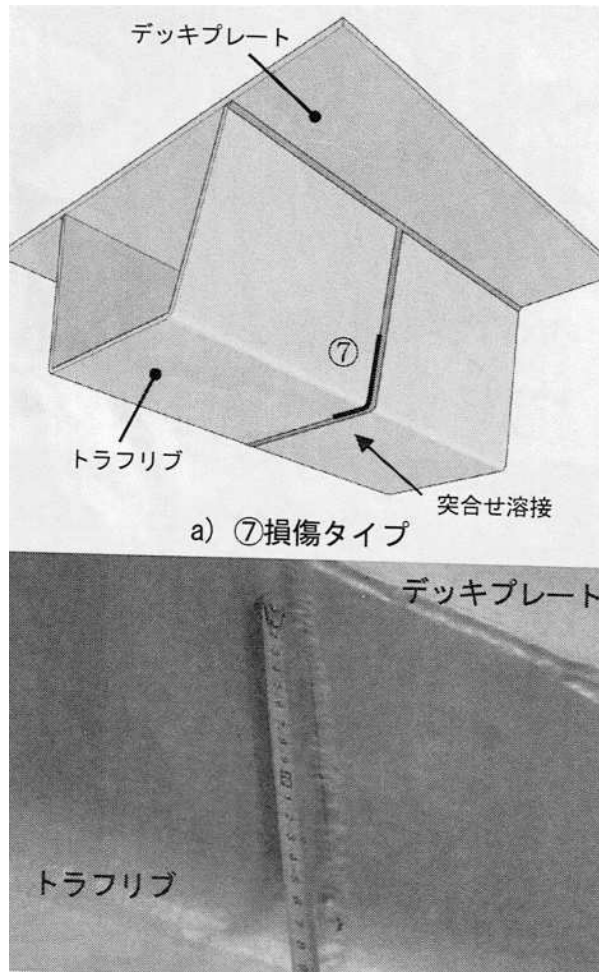
止端部形状測定

応力集中に影響



溶接品質の外観形状も重要

溶接欠陥・溶接品質④



引用：鋼床版の疲労：
土木学会

鋼床版閉断面リブの現場溶接



裏当て金を用いた片面溶接

現在道路橋では用いない方が良い
継手



高力ボルトによる接合が標準

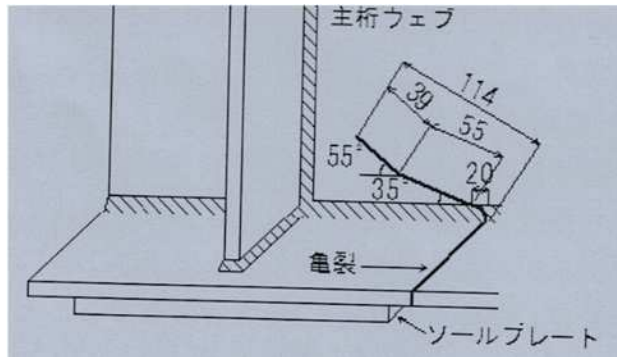
内部の溶接品質を確認できない

疲労設計の基本

溶接品質の確認・確保が難しい
溶接ディテールは用いない

設計では考慮されない局部的な、または構造全体の挙動から発生する二次応力①

ソールプレート溶接部

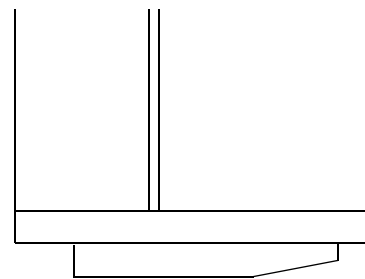


ソールプレート前面の断面変化による応力集中

特に腐食により支承機能の低下した支承部に発生



引用：鋼橋の疲労対策技術：
土木学会



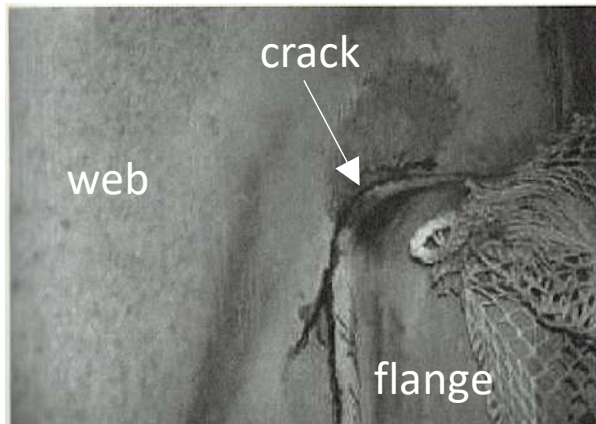
ソールプレート
前面のテーパ



ボルト取り付け

設計では考慮されない局部的な、または構造全体の挙動から発生する二次応力③

桁端切り欠き



引用：鋼橋の疲労対策技術：
土木学会

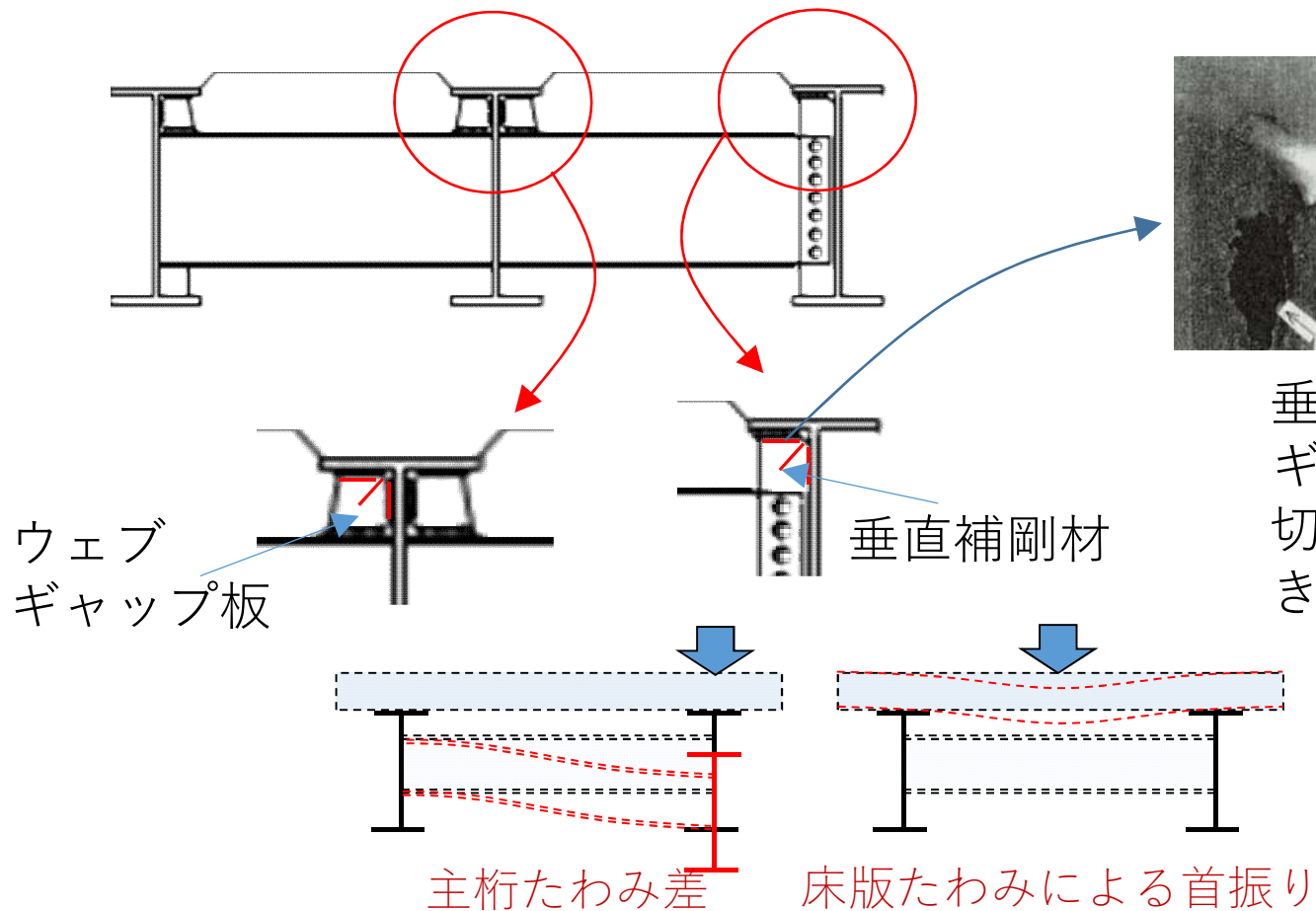
ウェブ切欠き部の応力集中
溶接部の不具合

同様の損傷はゲルバー梁の
中間ヒンジ部にも生じる

設計では考慮されない局所的な、または構造全体の挙動から発生する二次応力②

主桁と中間横桁・対傾構接合部

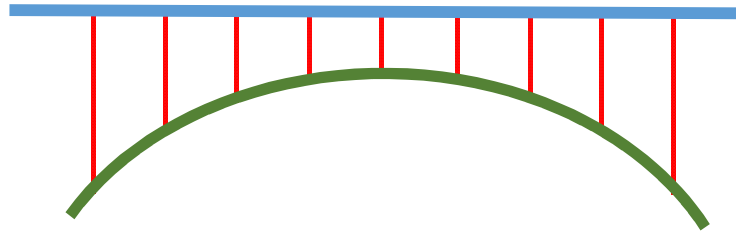
引用：鋼橋の疲労対策技術：
土木学会



垂直補剛材（ウェブ
ギャップ板）上端が
切れると首溶接に
き裂発生の可能性

設計では考慮されない局所的な、または
構造全体の挙動から発生する二次応力③

アーチの垂直材接合部

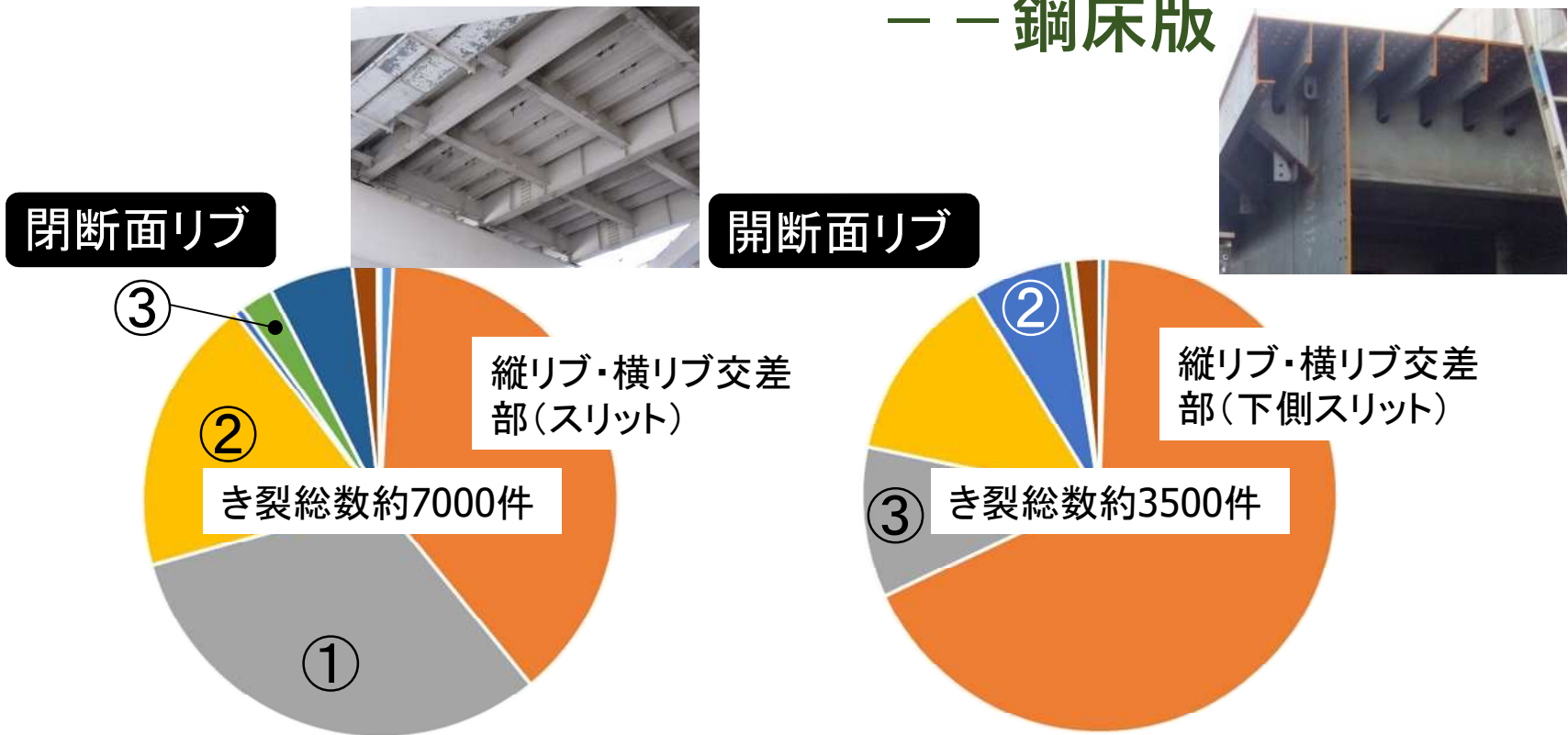


補剛桁とアーチリブの
水平変位差により垂直
材と補剛桁下フランジ
溶接部に生じた二次応
力によりき裂発生



設計では考慮されない局所的な、または構造全体の挙動から発生する二次応力

— 鋼床版

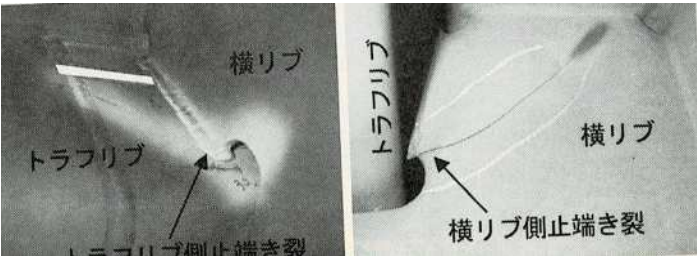
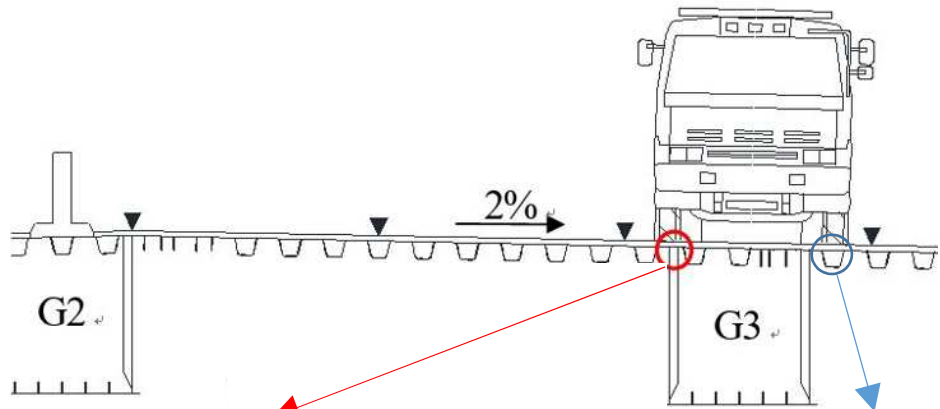
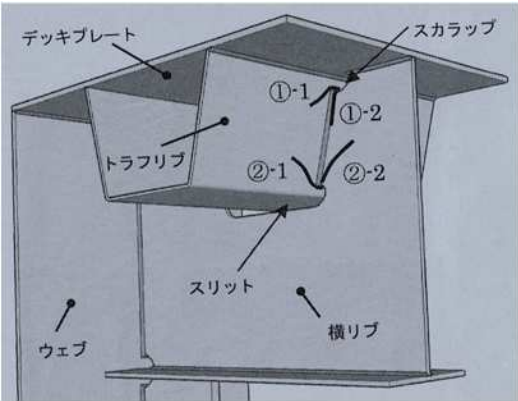


- ①縦リブとデッキプレート溶接部
- ②垂直補剛材とデッキプレート溶接部
- ③横リブとデッキプレート溶接部

→ デッキに進展し、路面陥没につながる重要なき裂

データ引用：鋼床版の疲労：土木学会2010

- ①縦リブとデッキプレート溶接部
- ②垂直補剛材とデッキプレート溶接部
- ③横リブとデッキプレート溶接部



引用：鋼床版の疲労：土木学会

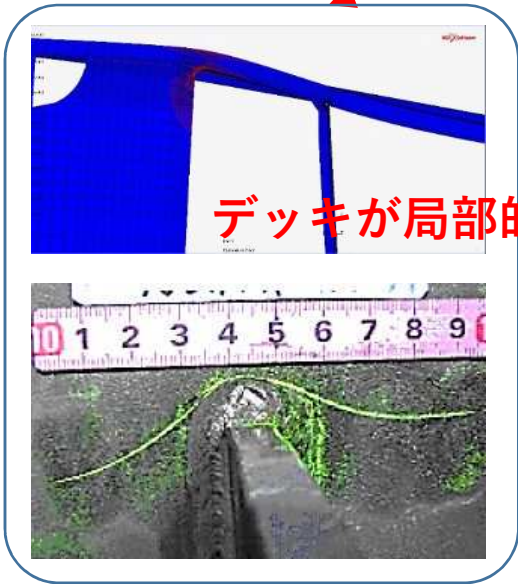
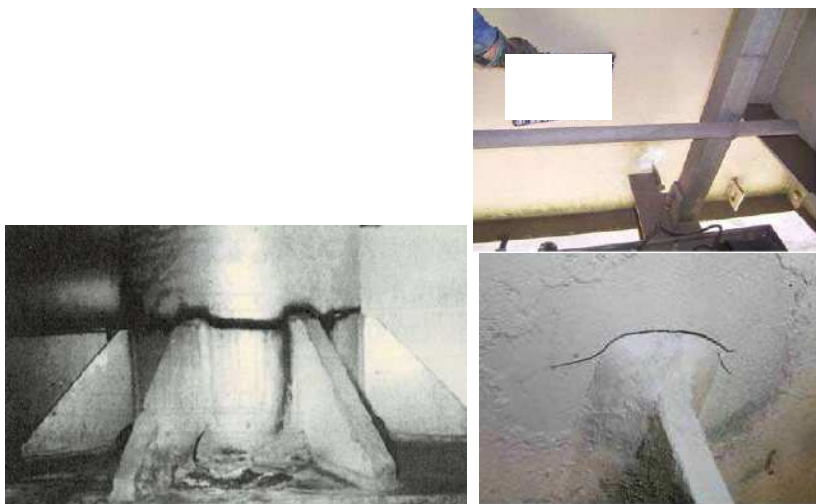


Diagram and photograph showing tire load, deck penetration cracks, and weld penetration. Labels include: 輪直下は板厚16mm以上 (12mm以上からの変更) (Directly under the wheel, plate thickness 16mm or more (change from 12mm or more)), デッキ貫通き裂 (Deck penetration crack), ビード貫通き裂 (Bead penetration crack), and 溶接溶込み75%以上 (Weld penetration 75% or more).

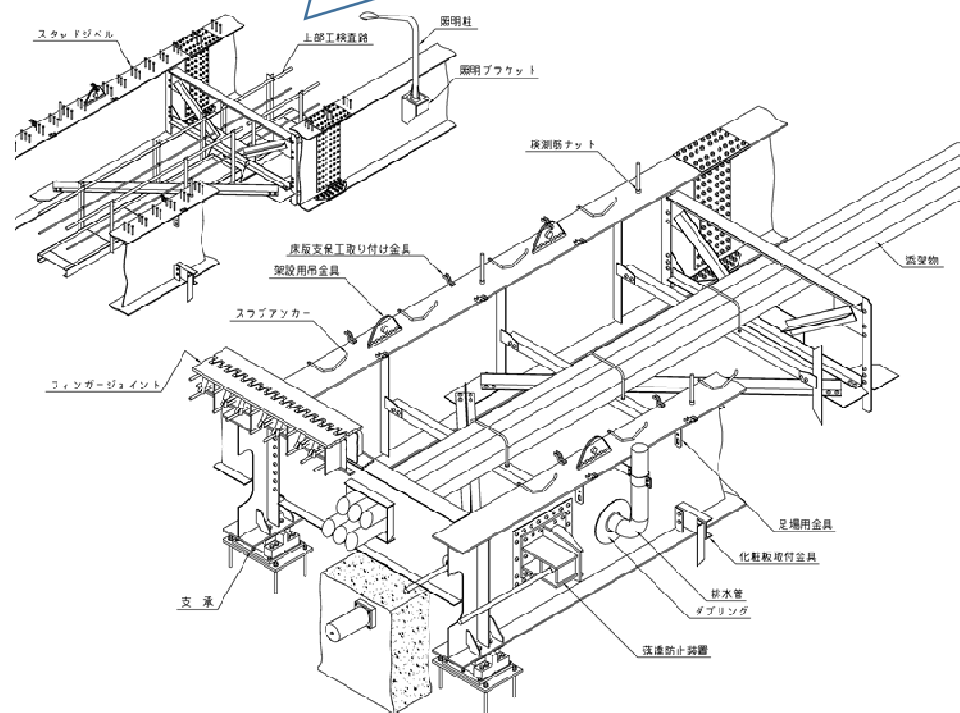
予期せぬ振動（風・交通振動など）

揺れやすい部材は注意です！

標識柱や照明柱、
検査路取付部など
付属物およびその取付部
なども注意が必要



橋梁点検時には付属物の
点検も忘れずに



疲労耐久性の向上

疲労耐久性を支配するパラメータ

応力範囲 $S(\Delta\sigma)$

繰返し数 N

VS

疲労強度 C

作用を下げる

抵抗を上げる

断面構成・継手位置の
検討

交通制限

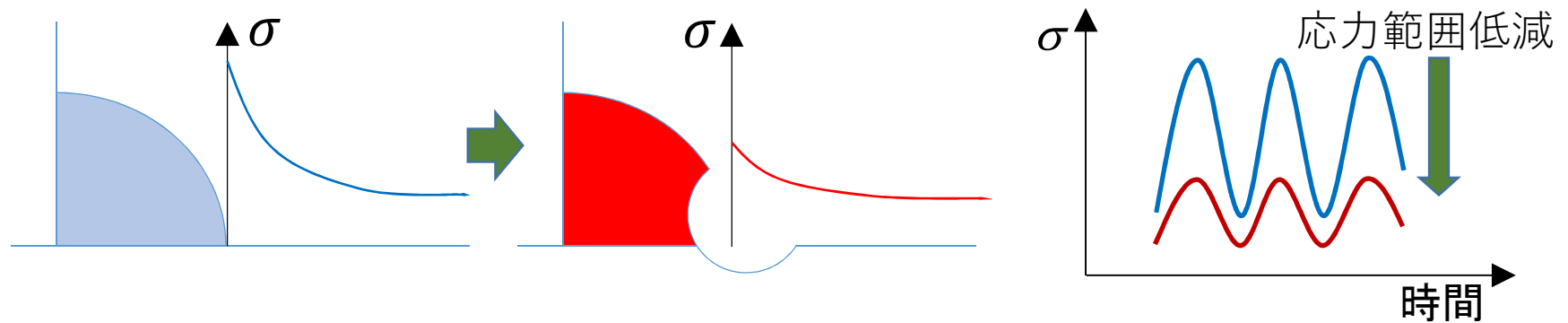
溶接継手の疲労強度を
向上

接合・構造ディテールの
改善

構造全体の改良

溶接継手の疲労強度向上①

溶接止端部の形状を改善することにより**応力集中を低減**する方法



① グラインダー処理

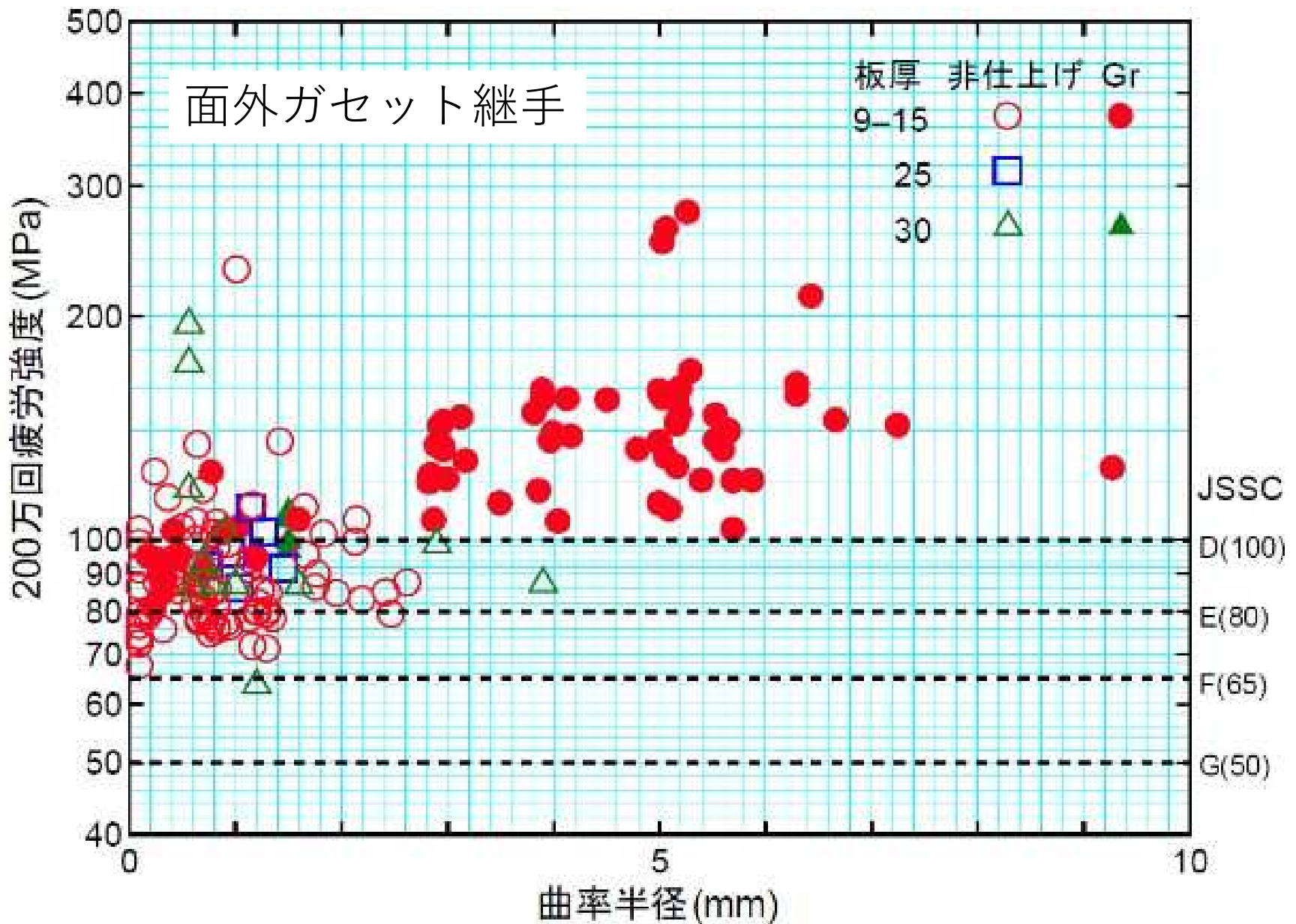
バークグラインダーを用いて
止端部を滑らかに研削



止端部ラインが
残った悪い例

- 曲率半径 3 mm 以上で 1 等級向上
- あまり深くなならないように
(でも止端部ラインが
残らないように)

グラインダー処理による疲労強度向上効果の例



②TIG処理

非消耗電極（タングステン電極）
を用い、溶接部との間に発生した
アークにより**止端を再熔融**する



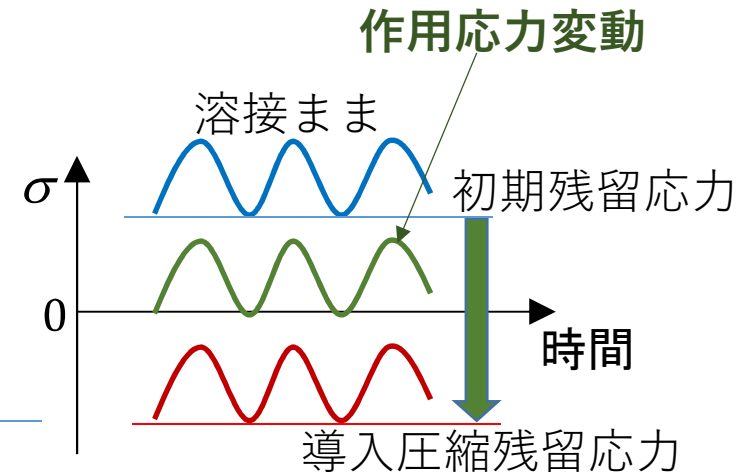
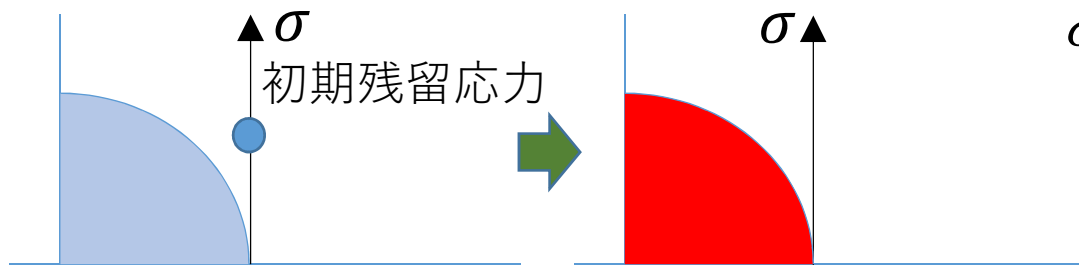
③付加溶接（溶接ビード形状の問題です）



この写真はLTT（低温相変態溶材）を使い付加
溶接したもののなので少し目的が違いますが

溶接継手の疲労強度向上②

溶接部に**圧縮残留応力**を導入する方法



①ピーニング処理

止端部（近傍）を打撃して
塑性変形を与えて圧縮残留応力
を導入する方法

● 導入圧縮残留応力

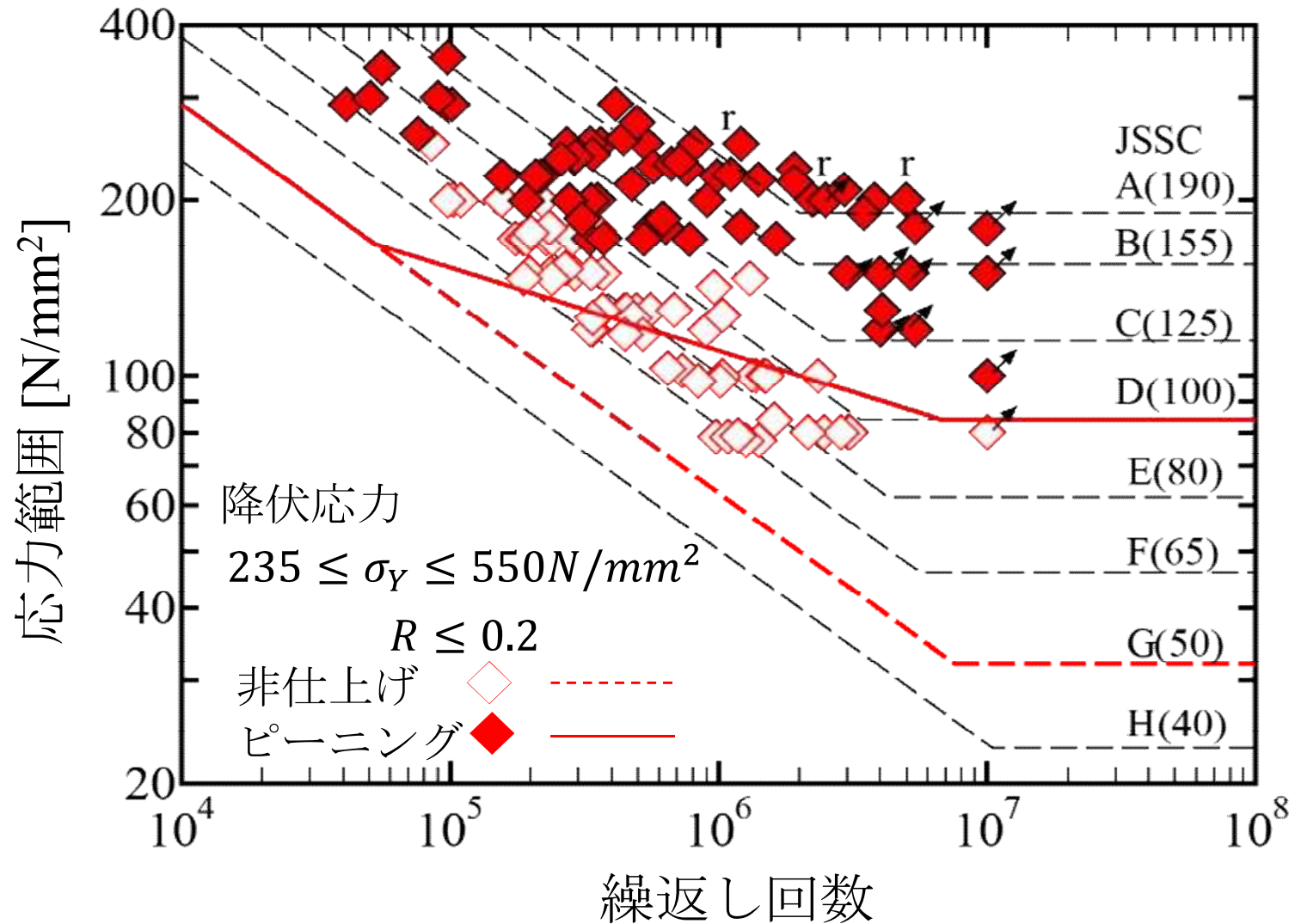


25年くらい前のハンマーピーニング状況

ピーニング処理による疲労強度向上効果の一例

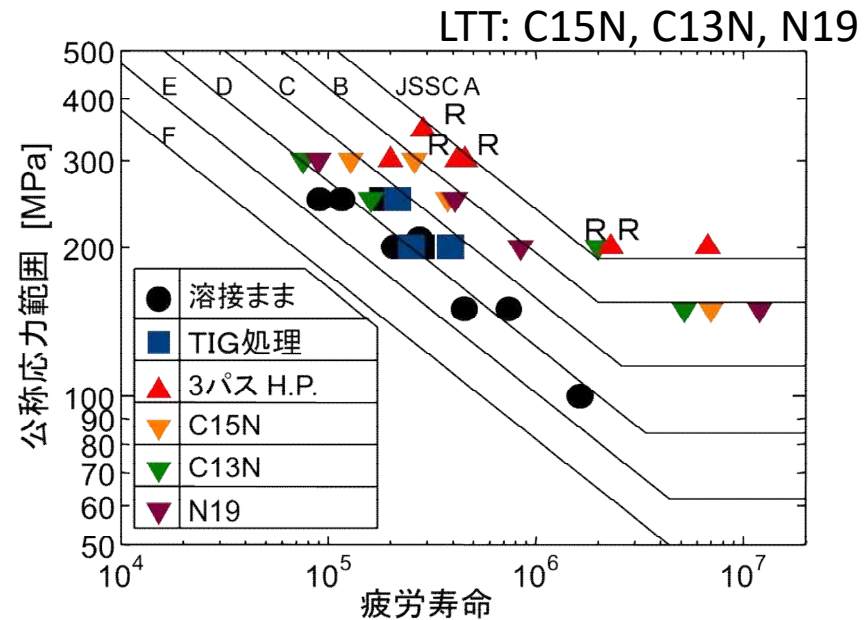
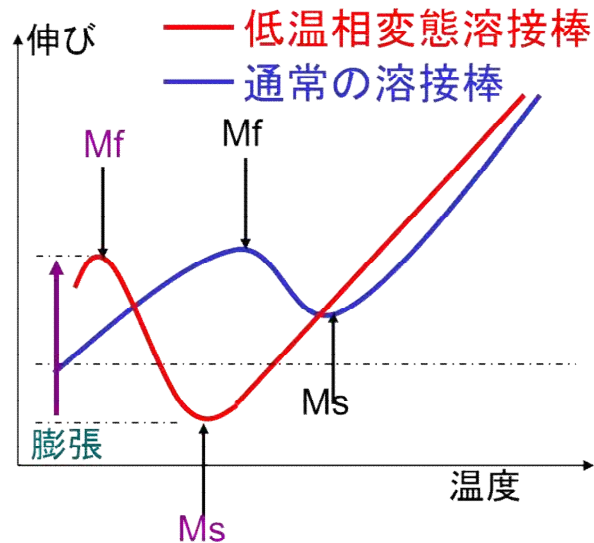
面外ガセット継手

鋼材強度・応力比に影響



②低温相変態溶接棒（LTT）の採用

溶接冷却時の相変態温度を下げた溶接材料。溶接時に圧縮残留応力を導入することが可能



③加熱処理

溶接部周辺を加熱し、溶接残留応力を低減もしくは圧縮残留応力を導入しようとする手法

接合・構造ディテールの改善

疲労設計の基本として

疲労強度の著しく弱いディテールを用いない

疲労強度等級の極端に低い継手形式

過去に疲労き裂が多く発生している継手形式

過度に応力集中するような形式

溶接品質の確認・確保ができないディテール
は用いない

き裂発生起点の除去

- (1) ボルト接合の採用
- (2) 完全溶込み溶接の採用

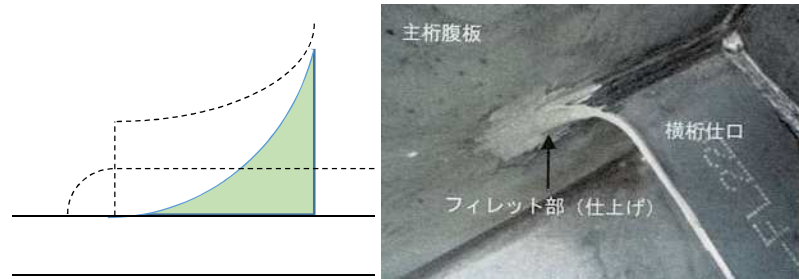
鋼道路橋疲労設計便覧では構造の改善として

- (1) 部材接合部の構造改善
- (2) 剛性急変部の構造改善
- (3) 部材間の力の伝達を円滑にする
- (4) 拘束を解放する

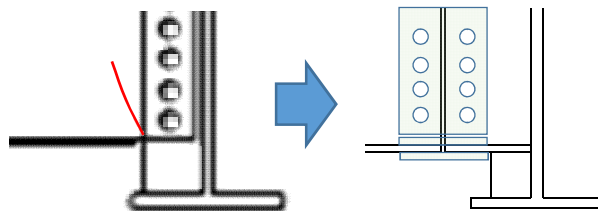
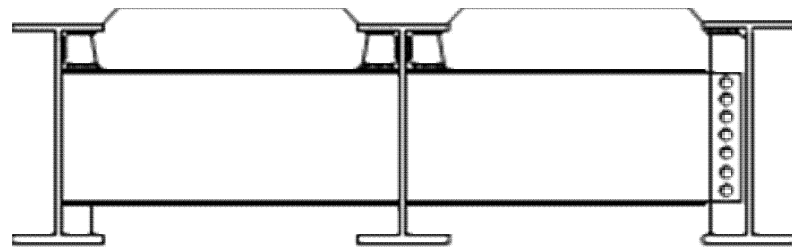
が挙げられているが、どれも過度な応力集中を防止することが目的

(1)部材接合部の構造改善

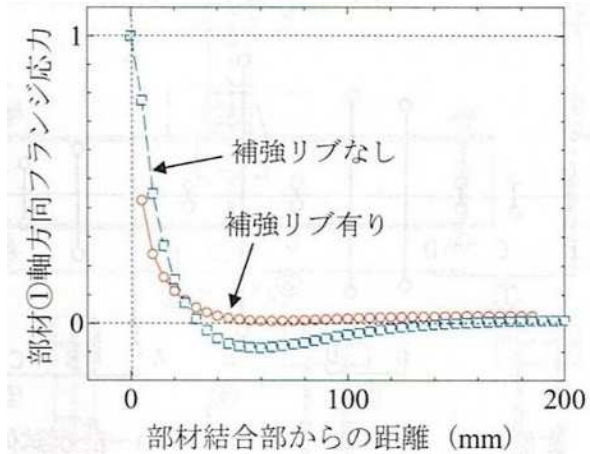
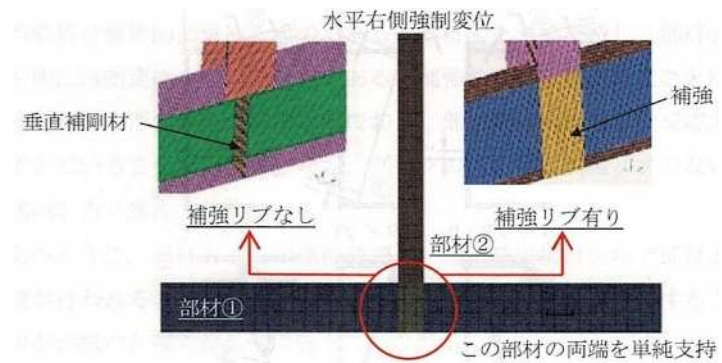
例えばフィレット構造の採用
(横桁仕口・鋼製橋脚隅角部)



(2)剛性急変部の構造改善



(3)部材間の力の円滑伝達



ご清聴ありがとうございました