

鋼橋の強靱化・長寿命化研究委員会(Ⅱ期)

疲労強度研究部会 報告

— 疲労強度向上と検知・補修技術評価 —

芝浦工業大学 穴見健吾

疲労強度研究部会 委員構成

主査
幹事長

幹事

委員

オブザーバー

オブザーバー

オブザーバー

オブザーバー

穴見 健吾

判治 剛

松下 政弘

網谷 岳夫

石川 敏之

内田 大介

小野 秀一

亀崎 令

木下 幸治

清川 昇悟

栗原 康行

小林 裕介

澁谷 敦

白旗 弘実

杉山 裕樹

富永 知徳

平野 秀一

平山 繁幸

福本 守

細見 直史

大西 孝典

大西 諒

館石 和雄

村井 啓太

芝浦工業大学

名古屋大学

(株)神戸製鋼所

東日本旅客鉄道(株)

関西大学

法政大学

(一社)日本建設機械施工協会施工技術総合研究所

川田工業(株)

岐阜大学

(株)横河ブリッジ

JFEスチール(株)

(公財)鉄道総合技術研究所

(国研)土木研究所

東京都市大学

阪神高速道路(株)

新日鐵住金(株)

首都高速道路(株)

(一財)首都高速道路技術センター

西日本旅客鉄道(株)

日本ファブテック(株)

国立研究開発法人土木研究所

国土交通省国土技術政策総合研究所

名古屋大学

(国研)土木研究所

疲労強度研究部会

疲労強度向上WG

WG長：石川 敏之（関西大学）

維持管理WG

WG長：判治 剛（名古屋大学）

疲労強度向上WGの検討項目

ピーニング処理を施した溶接継手に対して



疲労試験の実施・国内外のデータ収集

疲労設計線の提案

(第I, II期)



橋梁設計・維持管理における適用効果
の明示(第II期)

新設橋梁への適用に向けて

ブラストの影響(第I期)

架設時の圧縮荷重の影響(第II期)



UIT
(Ultrasonic Impact
Peening)



母材打撃HP
(母材打撃ハンマー
ピーニング)



PPP
(エアー式ニードル
ピーニング)

疲労強度向上WG報告書目次

1章 はじめに

2章 鋼橋溶接継手の疲労設計データ

2.1 調査概要

2.2 調査結果

3章 ピーニング処理後の圧縮の荷重が疲労強度向上効果に与える影響 ②

3.1 板曲げ振動疲労試験に対する面外ガセット溶接継手の公称応力

3.2 各種ピーニング処理方法

3.3 ピーニング処理後の圧縮荷重作用が残留応力に及ぼす影響

3.4 ピーニング処理後に圧縮荷重が作用した面外ガセット溶接継手の疲労強度

4章 ピーニング処理された荷重非伝達型リブ十字溶接継手の疲労強度

4.1 疲労試験方法

4.2 疲労試験結果

5章 ピーニング処理された溶接継手の設計S-N関係 ①

5.1 面外ガセット溶接継手

5.2 荷重非伝達型リブ十字溶接継手

5.3 ピーニング処理による疲労強度改善効果の疲労設計への適用例

6章 まとめ

付録

- ・面外ガセット溶接継手に対する4点曲げ試験と板曲げ振動疲労試験結果の比較
- ・面外ガセット溶接継手の板曲げ振動疲労試験結果データ
- ・板曲げ振動疲労試験機を用いた面外ガセット溶接継手の評価法



リブ十字継手の疲労試験



板曲げ疲労試験

ピーニング処理された溶接継手の設計S-N関係

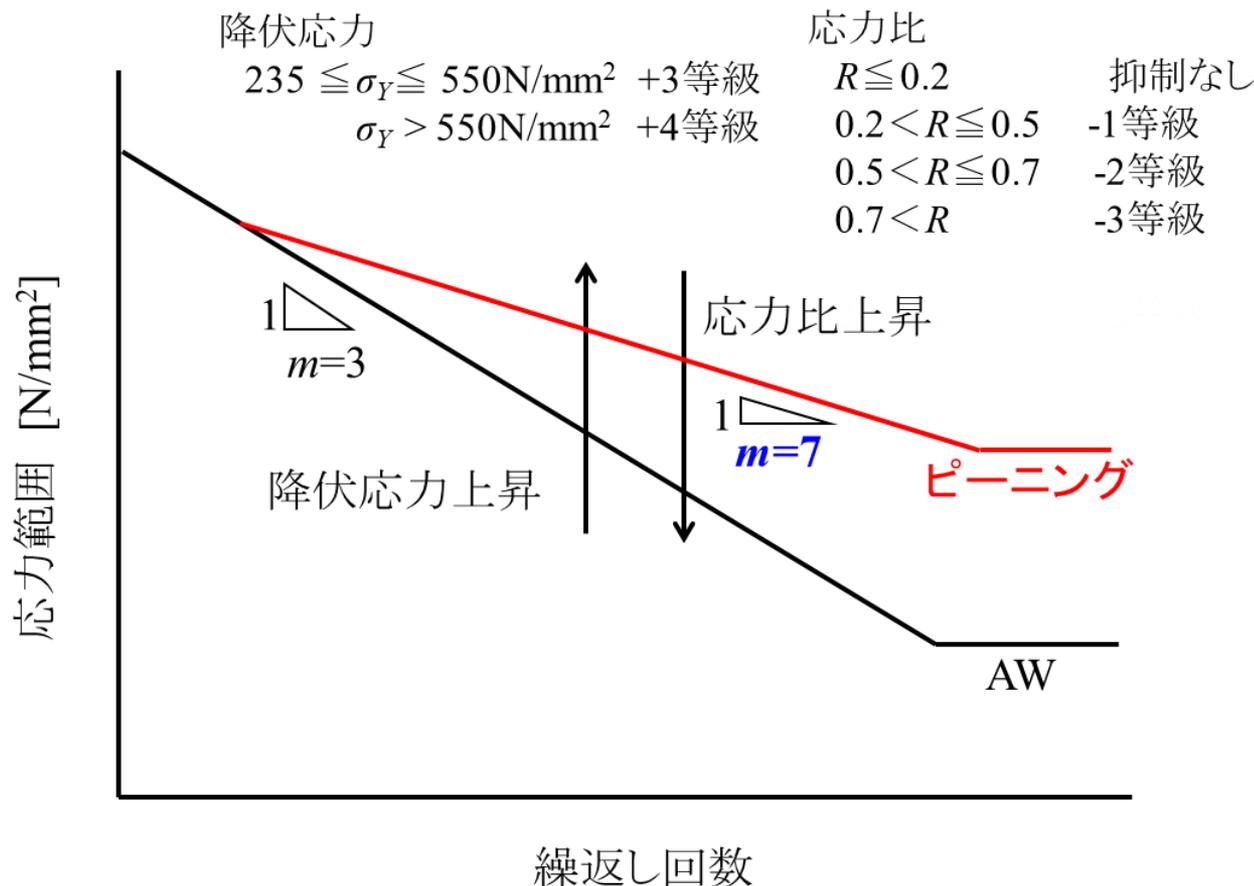
第I期にて、面外ガセット溶接継手を対象に

応力比・降伏強度に応じたピーニング処理後の疲労設計線の提案

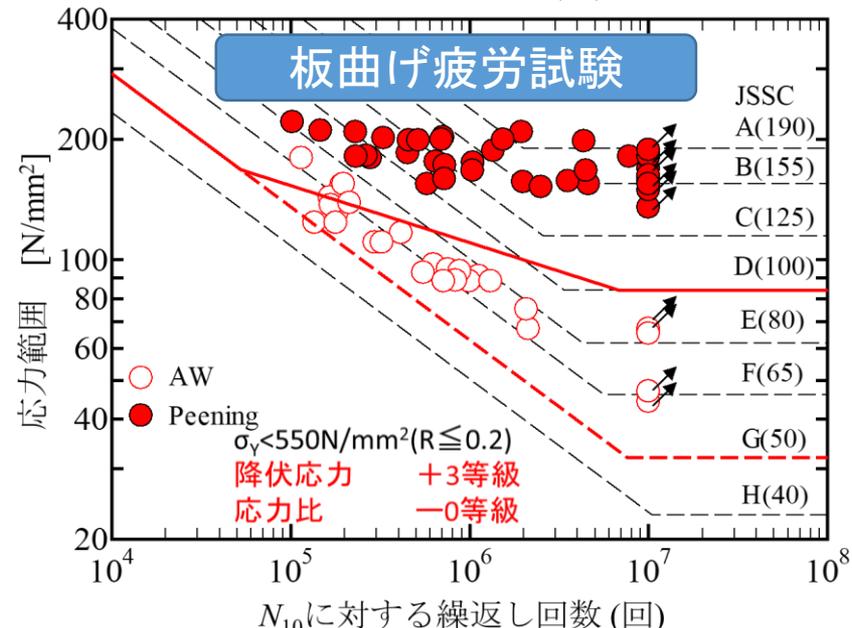
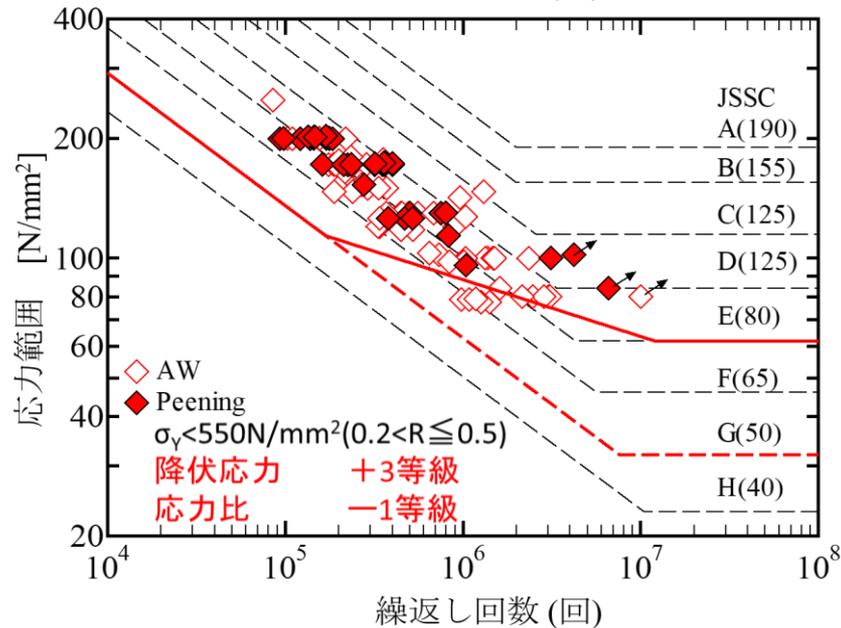
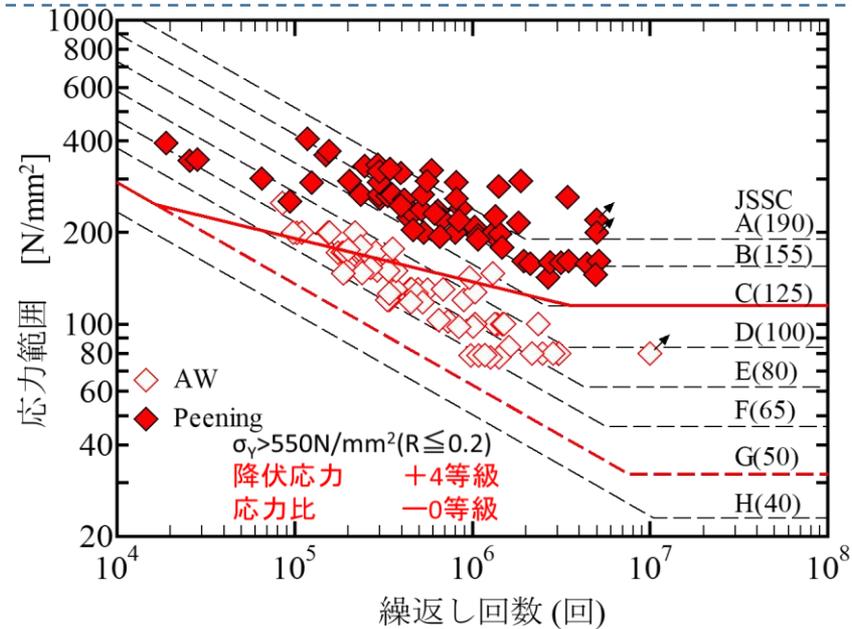
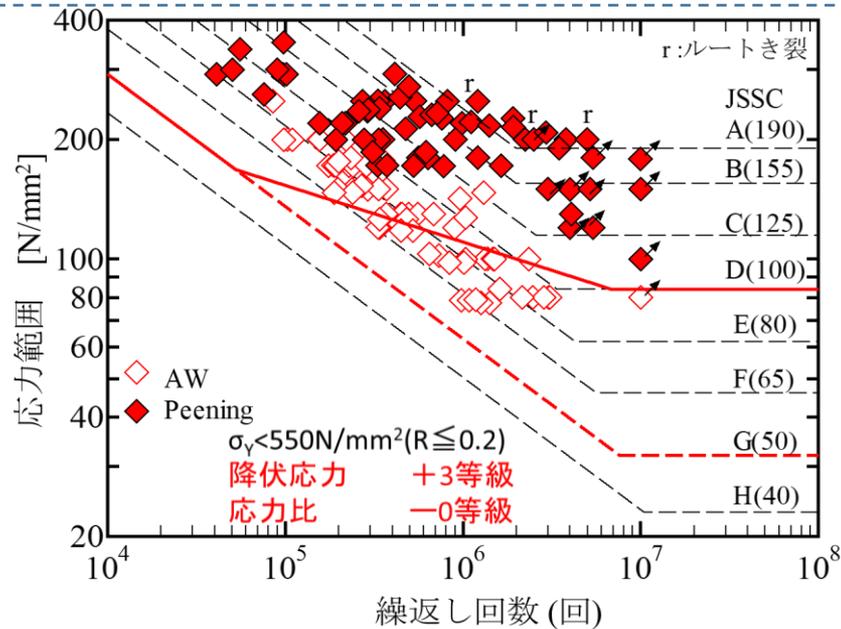


第II期・・・国内外のデータ拡充により提案設計線の精査

荷重非伝達型十字溶接継手 (実験<UIT 母材打撃HP PPP>・国内外データ収集)

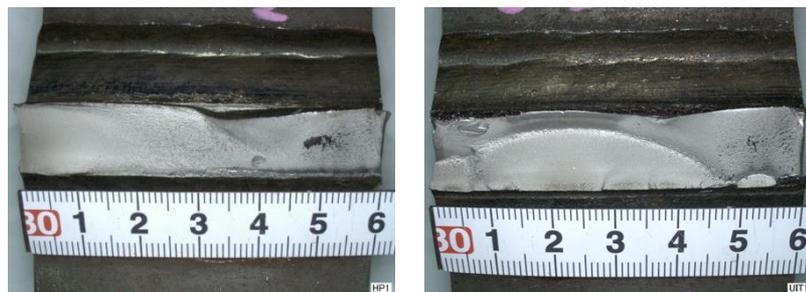
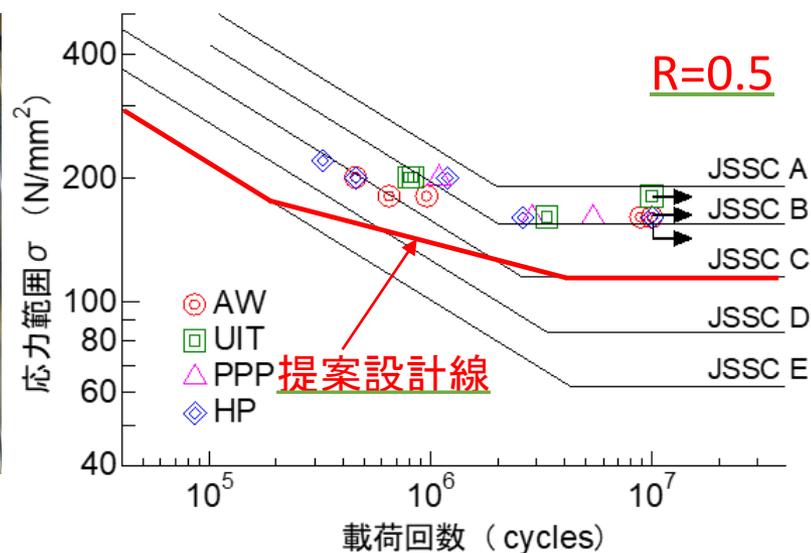
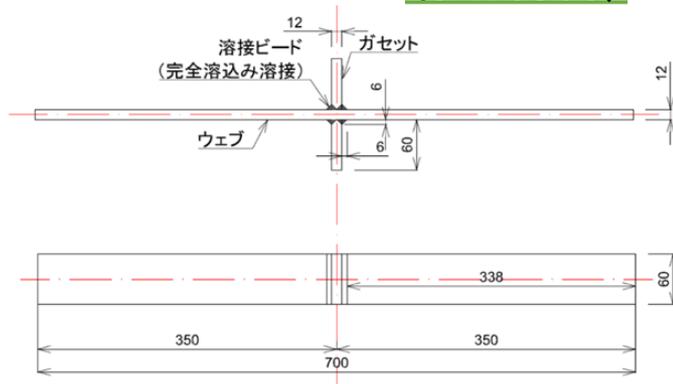


提案設計線と疲労試験データの関係(面外ガセット継手)一例



ピーニング処理リブ十字試験体の高応力比での試験データの蓄積と
面外ガセット継手で提案した疲労設計線のリブ十字継手への適用性確認

荷重非伝達型リブ十字試験体
(SBHS500)



き裂は試験体端部と中央部から発生した試験体がある

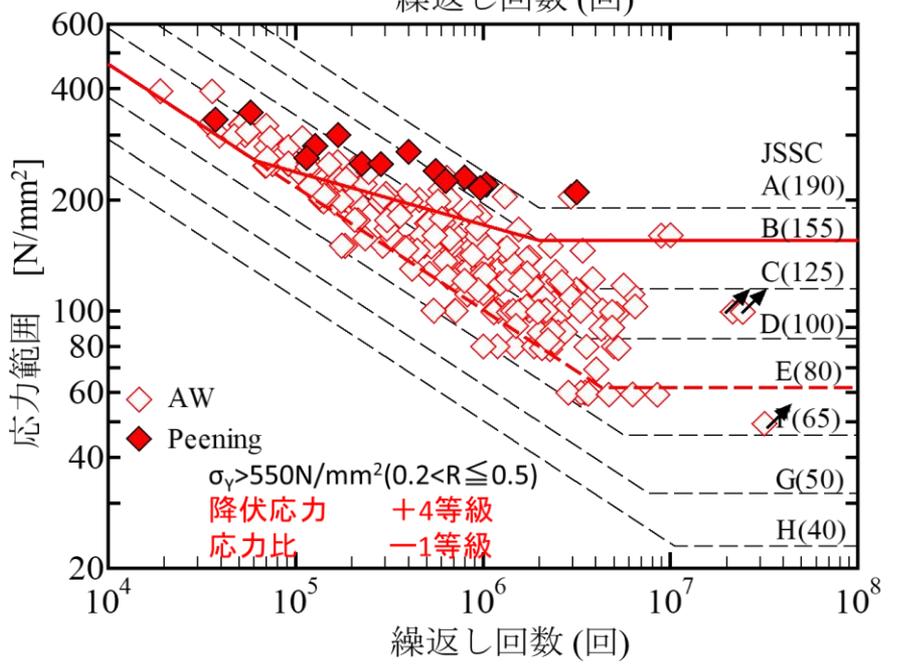
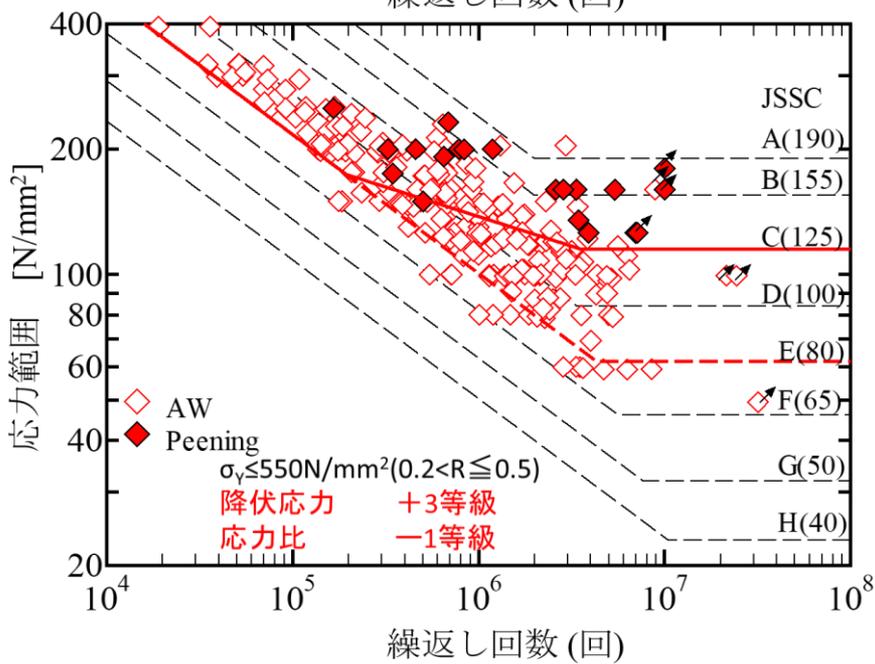
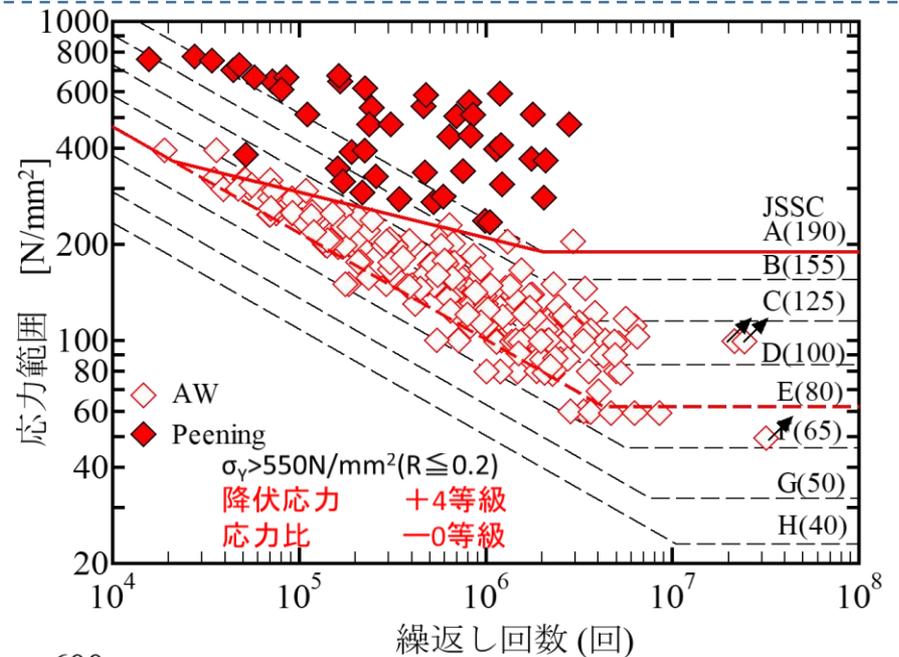
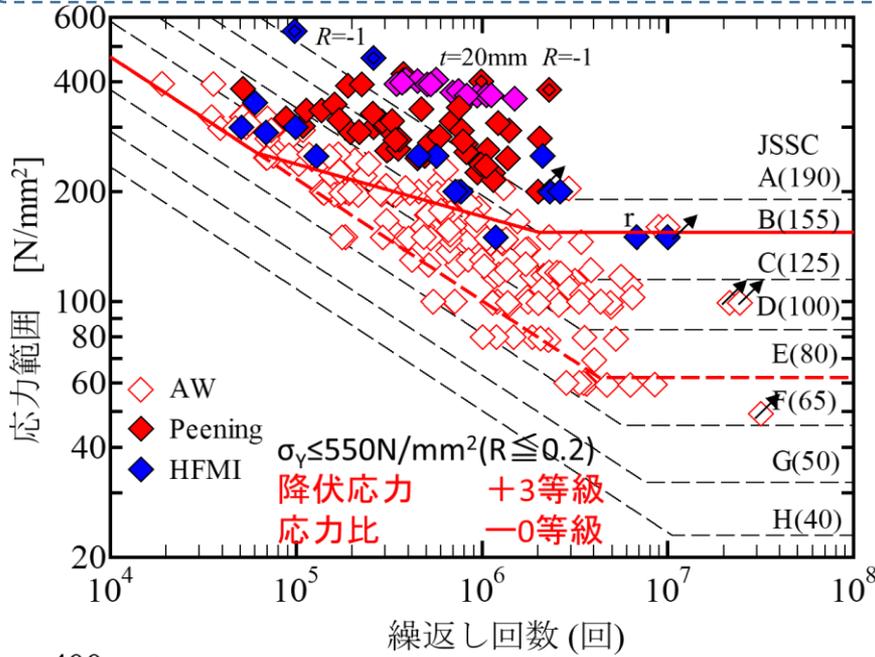
応力比 $R=0.5$ であること、また溶接まま試験体の疲労強度が大きいこともあり明確な疲労強度向上は見られないが、低応力範囲でB等級を満足

提案設計線 (SBHS500)

E等級 \rightarrow +3等級 \rightarrow -1等級 \rightarrow C等級

(SBHS500) ($R=0.5$)

提案設計線と疲労試験データの関係(荷重非伝達型十字継手)一例



ピーニング処理による疲労強度改善効果の疲労設計への適用例

ピーニング処理効果 ← 応力比・応力範囲・(過荷重)が影響

鋼道路橋の新設時のピーニングの適用性について設計計算書から検討
(応力照査を行うディテールに対してどれだけ有効か?)

日本橋梁建設協会設計小委員会へのアンケート

鋼道路橋対象に設計時に
疲労設計改善が求められ
た溶接継手について

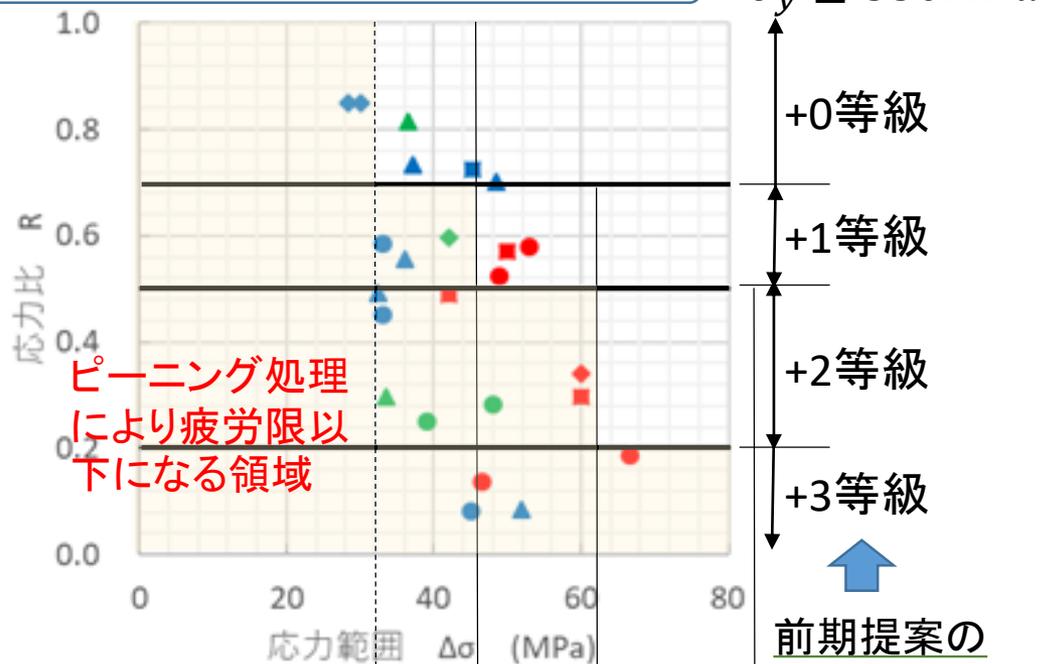
橋梁形式・設計条件
対象継手・鋼種
応力範囲・最大応力
(活荷重・死荷重応力)
NGへの対処方法

(有限寿命評価

止端部仕上げ・構造変更 etc)

提案ピーニング疲労設計曲線との比較

アンケート結果の一例: 面外ガセット継手

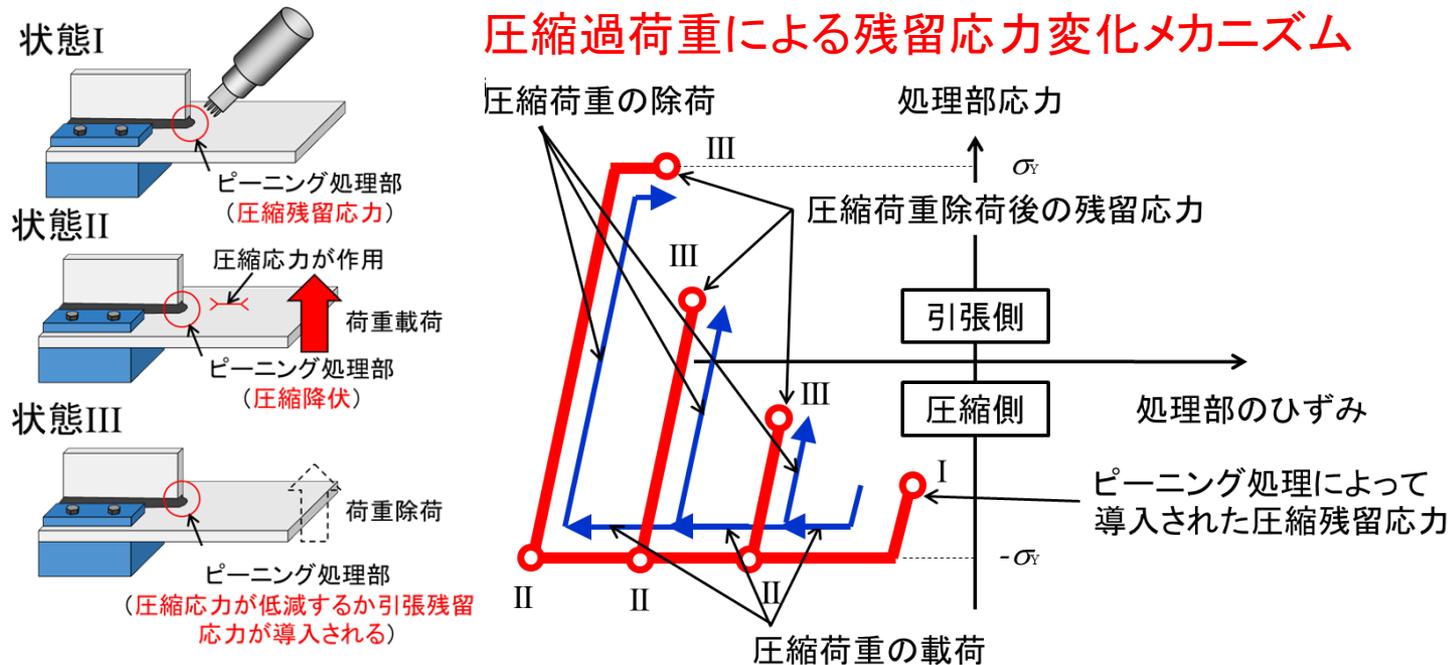


疲労限

マーク●■◇▲は構造部位の違い

ピーニング処理後の圧縮の荷重が疲労強度向上効果に与える影響

新設橋梁の架設時荷重を想定し、圧縮過荷重载荷による残留応力および疲労強度向上効果の変化を実験的に検討



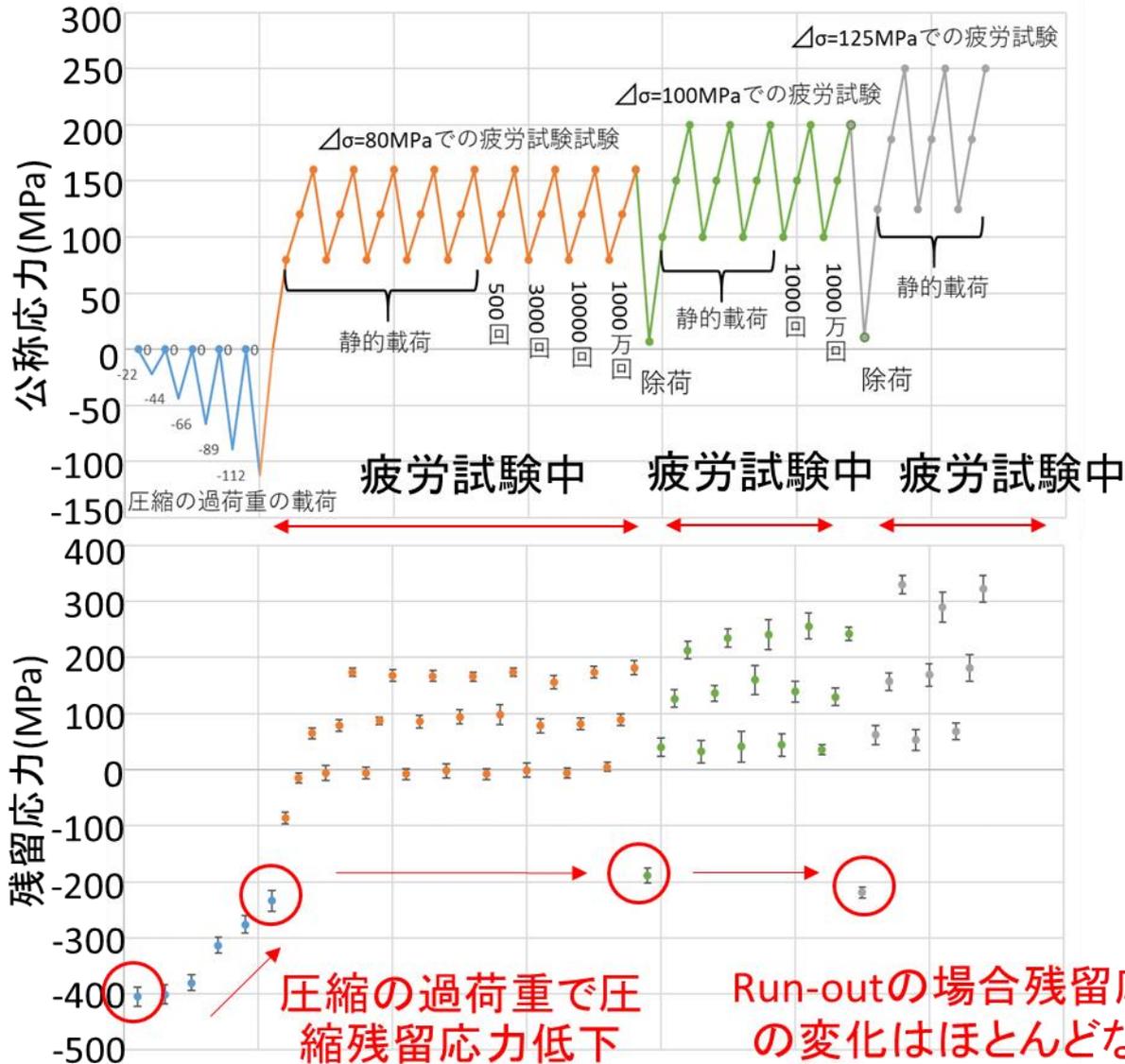
面外ガセット試験体
(SBHS400)



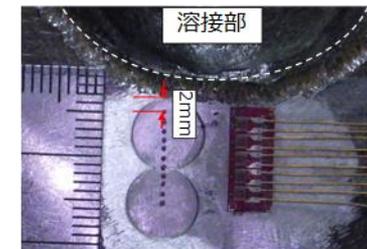
圧縮荷重载荷状況

	過荷重	公称応力
CL-5.8	5.8kN	-230MPa
CL-3.8	3.8kN	-150MPa
CL-2.5	2.5kN	-100MPa
CL-1.25	1.25kN	-50MPa

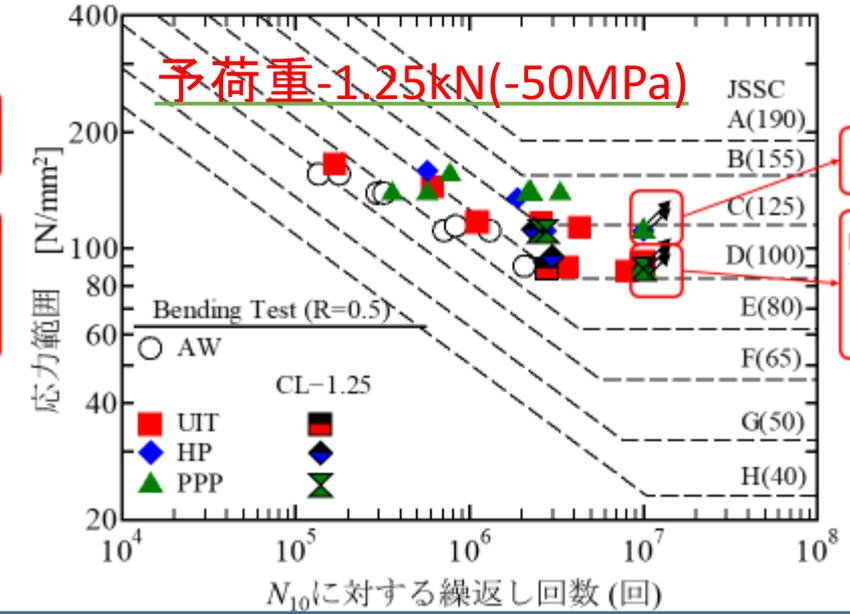
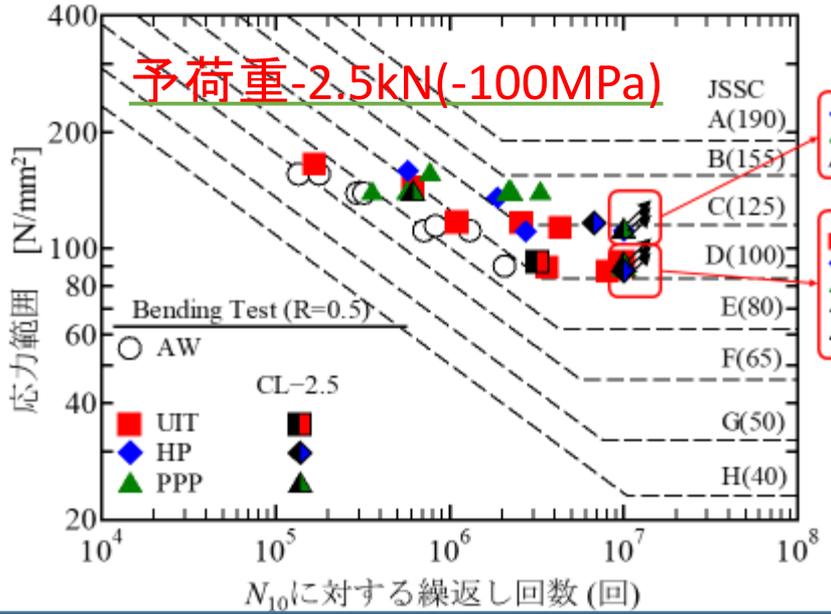
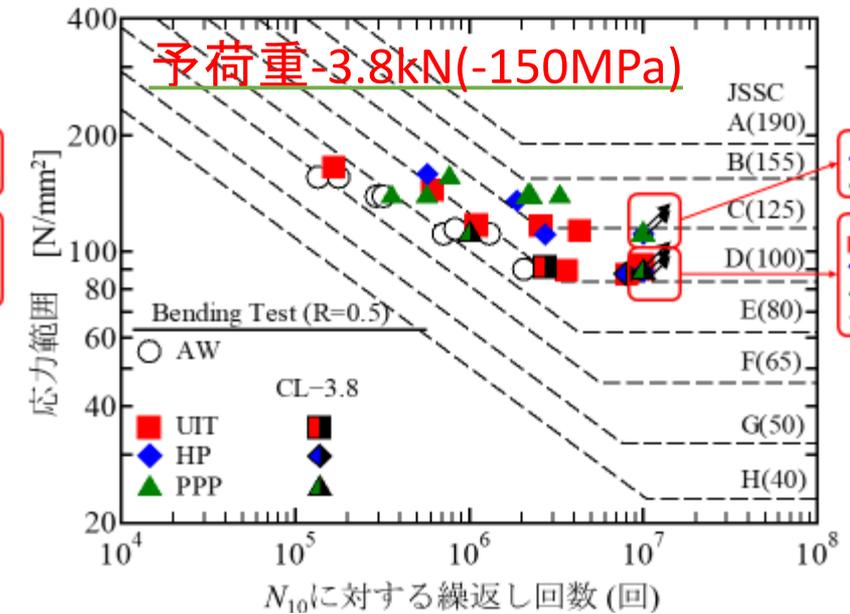
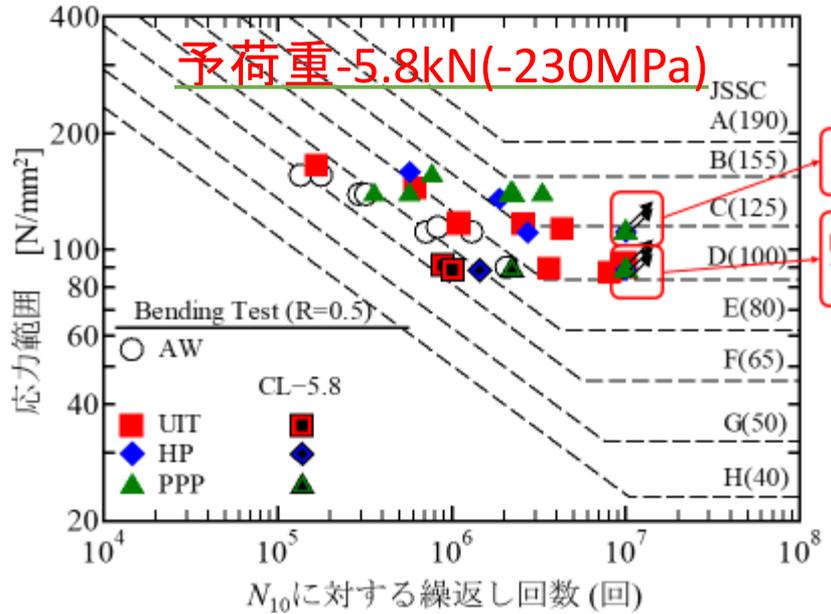
圧縮荷重載荷および疲労試験中の処理部近傍応力の変化(PPPの例)



残留応力計測位置
処理部端部より2mmの位置



ピーニング処理後に圧縮荷重が作用した面外ガセット溶接継手の疲労強度



圧縮予荷重応力で効果減少。R=0.5では、予荷重応力-50MPaで効果がない試験体も！

疲労強度向上WGのまとめ

- 面外ガセット溶接継手、十字継手の疲労試験、国内外のデータ収集を通じて、ピーニング後の溶接継手の疲労設計線を提案した。

Future work

大型・実橋サイズの継手での適用性確認
局部応力を用いた設計線

- ピーニング処理効果に対する圧縮過荷重の影響

1. 過荷重による導入圧縮応力の低下の様子を観察した

Future work

継手レベル(応力集中レベル)による残留応力の減少程度の差異の検討

2. 様々な過荷重レベルでの $R=0.5$ での疲労強度低下を確認した

Future work

種々の R での疲労試験を行い、提案疲労設計線に反映させる

疲労強度研究部会

```
graph TD; A[疲労強度研究部会] --- B[疲労強度向上WG]; A --- C[維持管理WG]; B --- B1[WG長: 石川 敏之 (関西大学)]; C --- C1[WG長: 判治 剛 (名古屋大学)];
```

疲労強度向上WG

WG長: 石川 敏之 (関西大学)

維持管理WG

WG長: 判治 剛 (名古屋大学)

維持管理WGの検討項目

点検

効率的かつ確実な疲労き裂検知に向けて

鋼橋の疲労き裂の点検が困難なディテールの調査(第I期)

塗膜上からのき裂検知

(第I, II期)

耐候性鋼材のき裂検知

(第II, *future work*)



補修・補強

効果的・合理的な補修・補強設計法に向けて

疲労強度推定式あり

溶接部へのSHの
適用性

止端部き裂

(第I期)

ルートき裂

(第II期)

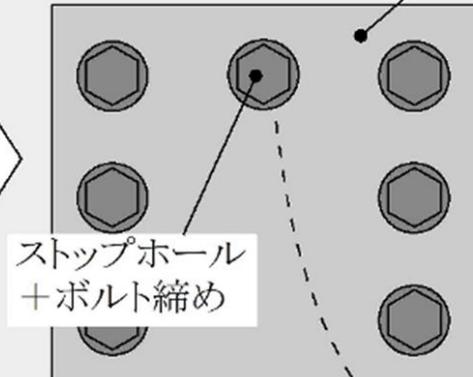
ストップホール(SH)

ストップホール



当て板工法

当て板



疲労強度推定式なし

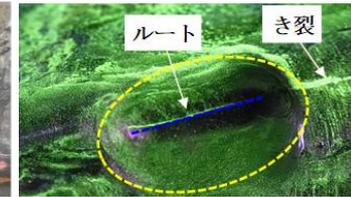
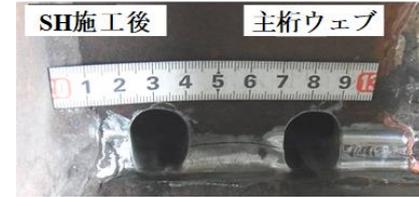
SH縁の応力、当て板
後の疲労強度評価

に基づく当て板設計

(第I, II期)

維持管理WG報告書目次

- 1 はじめに
- 2 塗装された溶接継手に生じた疲労き裂の検知 ①
 - 2.1 既往の各種き裂検知手法の検出精度
 - 2.2 塗膜上からのき裂検出の精度検証
- 3 溶接部を進展する疲労き裂に対するストップホール法の補修効果
 - 3.2 簡易モデルによるパラメータ解析と疲労試験
 - 3.3 ストップホールを施した溶接ルート部の疲労強度評価
 - 3.4 ストップホールを施した溶接止端部の疲労強度評価
- 4 当て板補修されたストップホールの疲労強度 ②
 - 4.2 当て板によるき裂補修の考え方
 - 4.3 疲労試験
 - 4.4 FEM解析による応力性状の確認
 - 4.5 疲労強度評価に関する検討
- 5 当て板補修されたストップホールの簡易解析法
 - 5.2 既往研究における疲労き裂への当て板補修の解析法
 - 5.3 各種解析モデルの比較
 - 5.4 簡易解析法の提案
- 6 長期間曝露された耐候性鋼溶接継手の疲労強度
 - 6.2 疲労試験方法
 - 6.3 疲労試験結果
- 7 まとめ



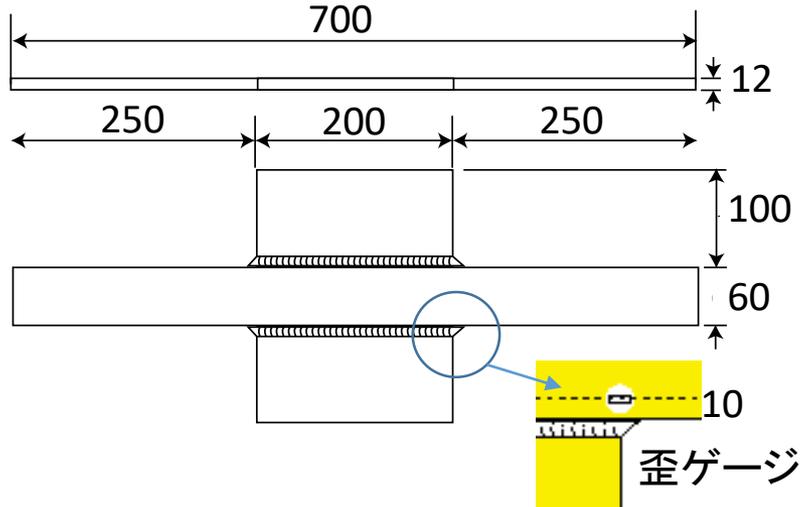
耐候性鋼橋のき裂

41年暴露状況

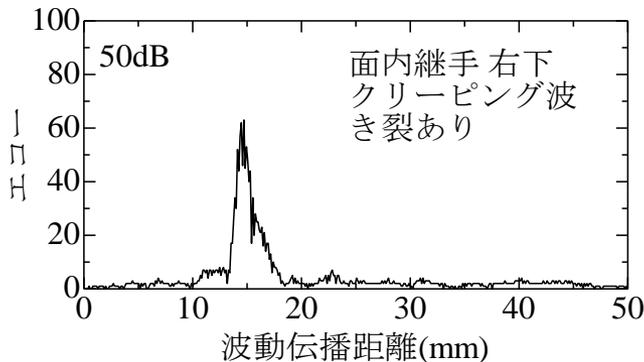
塗膜上からの疲労き裂検知の検討

非破壊検査手法(超音波探傷試験)により、塗膜の上からき裂を検出できる可能性について検討する。検出限界寸法・サイジングの検討は次期部会への継続。

試験体(面内ガセット試験体)



つかみ部を除いて全面塗装
C5系(道路橋) 2体 L2系(鉄道橋) 2体



母材こば面に
クリーピング探触子
を置いての探傷

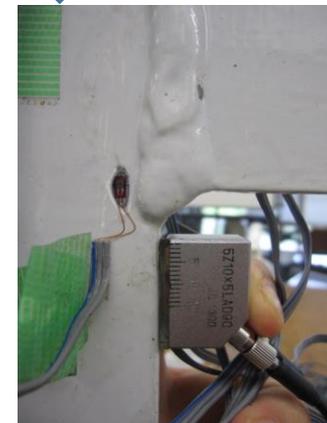


疲労試験の実施



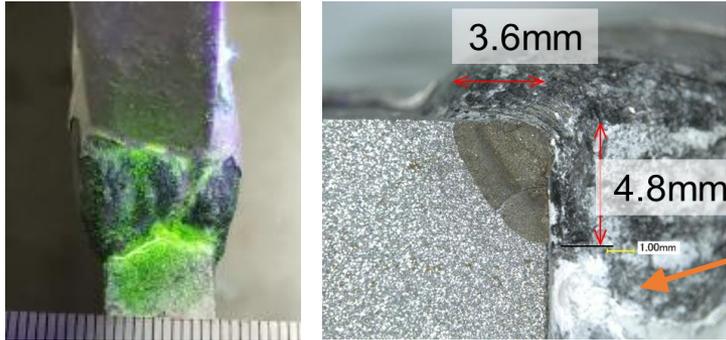
塗膜割れの観察
ひずみ変化の計測

非破壊検査の実施

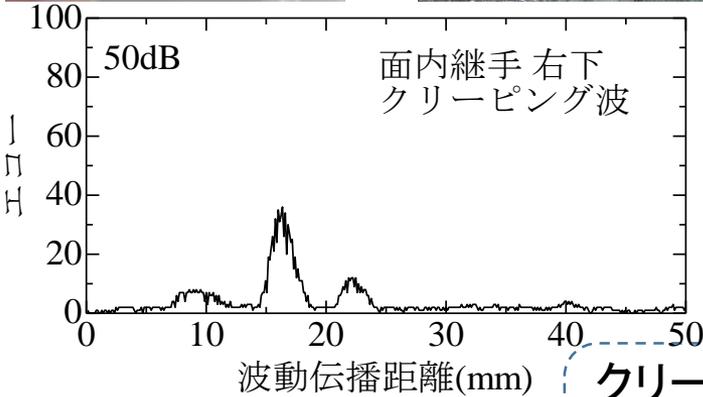
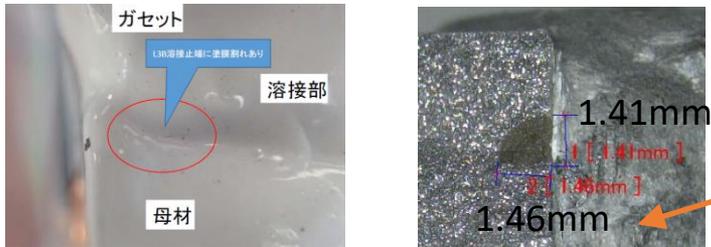


探傷精度検証
塗膜除去後MT
破面観察

探傷結果の例



UT波形・塗膜割れは前頁の図



試験結果のまとめ

C5-1試験体

	塗膜割れ	ひずみ変化	超音波指示	破壊試験
左上	無	無	無	き裂無
右上	無	無	無	き裂無
左下	無	無	無	き裂無
右下	有	有	有	き裂有

C5-2試験体

	塗膜割れ	ひずみ変化	超音波指示	破壊試験
左上	無	無	無	き裂無
右上	無	無	無	き裂無
左下	有	無	無	き裂無
右下	無	有	有	き裂有

L2-2試験体

	塗膜割れ	ひずみ変化	超音波指示	破壊試験
左上	無	有	有	き裂有
右上	無	有	無	き裂無
左下	無	無	無	き裂無
右下	無	無	無	き裂無

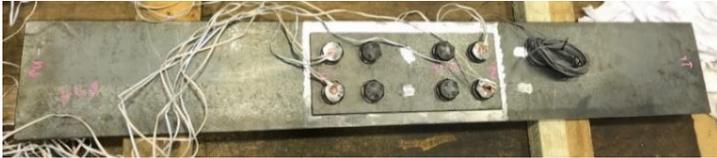
クリーピング波で探触子を母材のこば面においての探傷が有効
 き裂寸法 1.5mm × 1.5mmでも検出可能であった
 見逃し・空振りはUTでは見られなかった

合理的な当て板補強に向けて

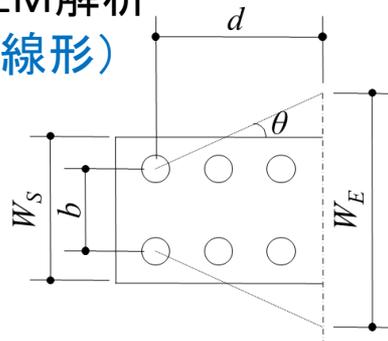
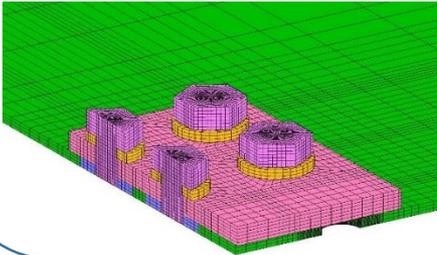
軸引張状態において

き裂長さ・当て板構造(板厚・ボルトピッチ P など)
よりSH縁の応力の推定 (第1期)

実験による検討



接触を考慮した高度なFEM解析
(材料・幾何非線形)



$$\alpha_{SH,s} = \beta \cdot \alpha_{SH,n}$$

$$\beta = f \cdot \frac{\sigma_c}{\sigma_n}$$

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_n} = \frac{W_E t_M}{2W_S t_S + (W_E - l_C) t_M}$$

当て板による
断面増効果

$$f = 0.776 \left(\frac{l_C}{P} \right)^{-0.597}$$

架橋効果

当て板下SH縁応力集中
の簡易解析手法

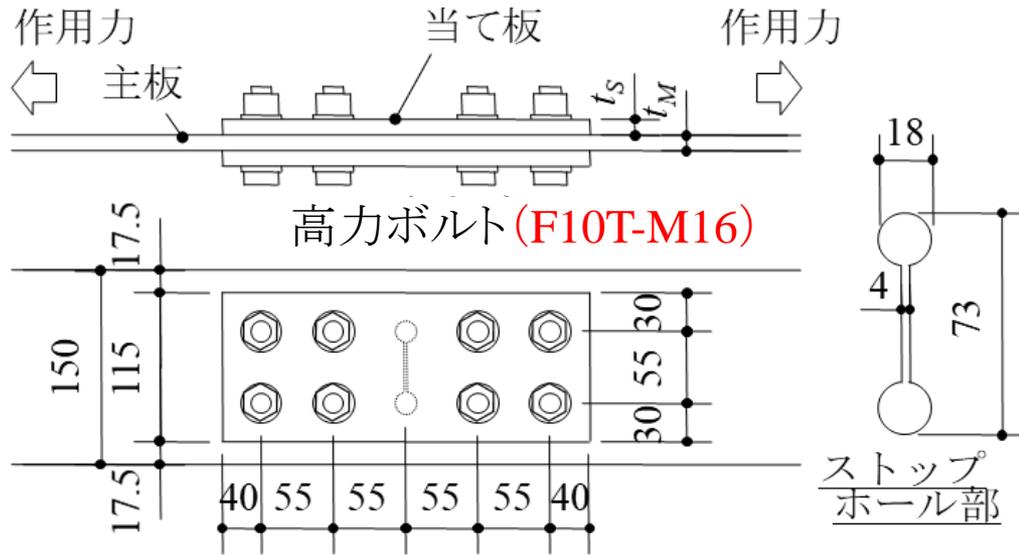
軸引張だけでなく種々の
応力場への適用拡大

future work

補強後寿命を考慮した
合理的な当て板設計

SH縁の応力範囲を用いた
当て板後の疲労強度評価法の検討

当て板下ストップホールの疲労強度評価



き裂発生位置の推定

高力ボルト継手の疲労強度
(フレットング: JSSC-B)

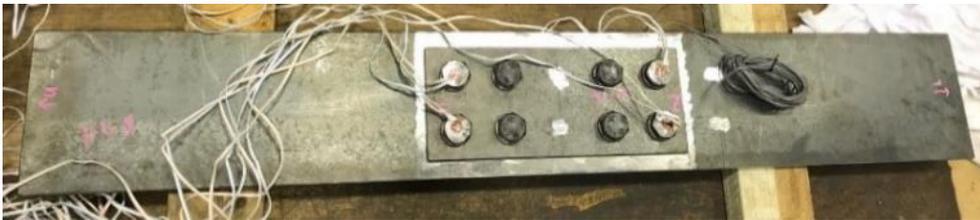


$$\alpha_{SH,s} < 1.59$$

当て板なしSH縁の応力を用いた疲労強度評価法が使用可能とした場合の疲労強度



当て板下のSH縁の応力集中算定(第I期)



No.	主板厚	当て板厚	SH縁の 応力集中係数	想定される疲労き裂
0	12	なし	6.21	
1	12	12	1.48	接合面でのフレットング
2	12	6	2.38	
3	12	3.2	3.27	SH円孔壁からのき裂

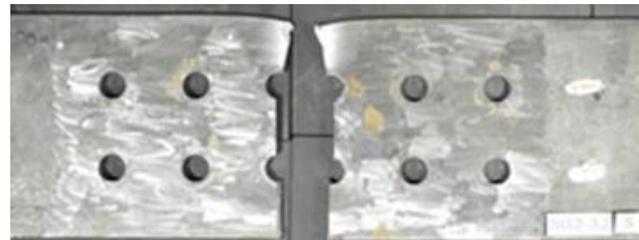
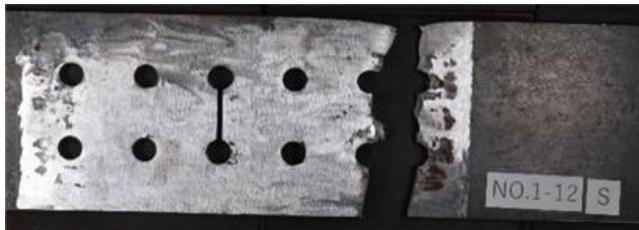
疲労試験結果と破面

疲労き裂発生点

当て板なし: SH壁

当て板あり: 当て板厚12mm, 6mm ボルト孔近傍(フレッチング)

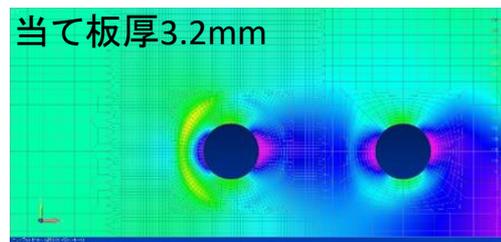
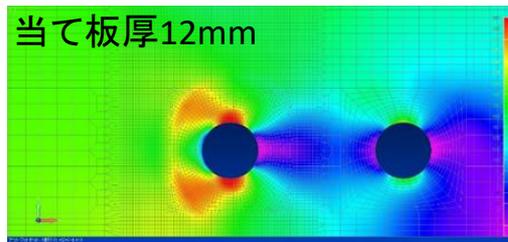
当て板厚3.2mm SH壁・ボルト孔近傍



ボルト孔近傍

SH壁(当て板試験体では1体のみ)

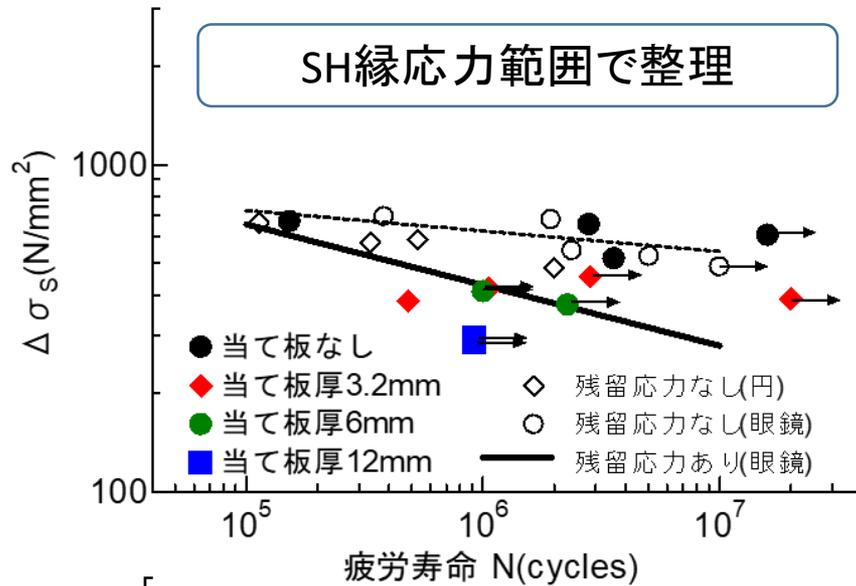
ボルト孔・SH孔近傍の応力分布の確認(5章の高度モデルと同等のモデル)



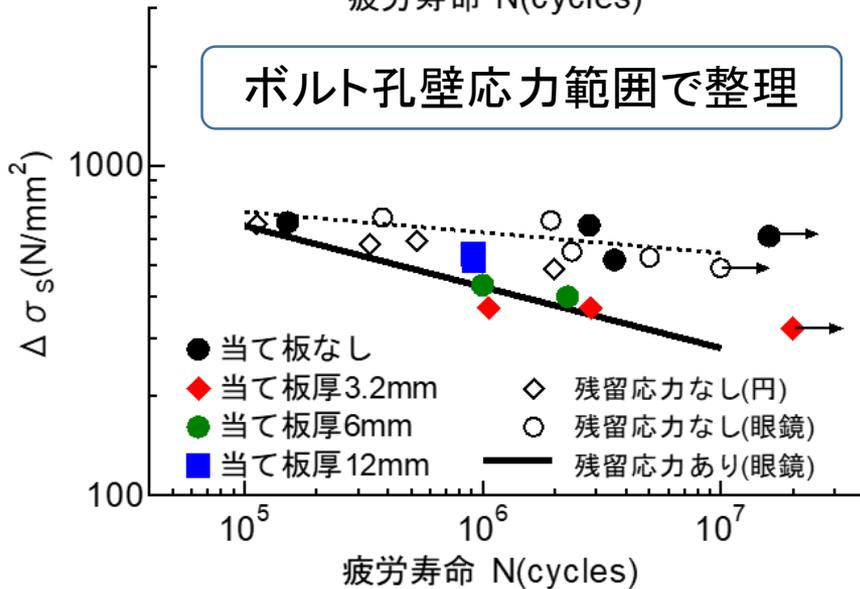
最大荷重載荷時の最大主応力分布

疲労試験結果

SH縁応力範囲で整理

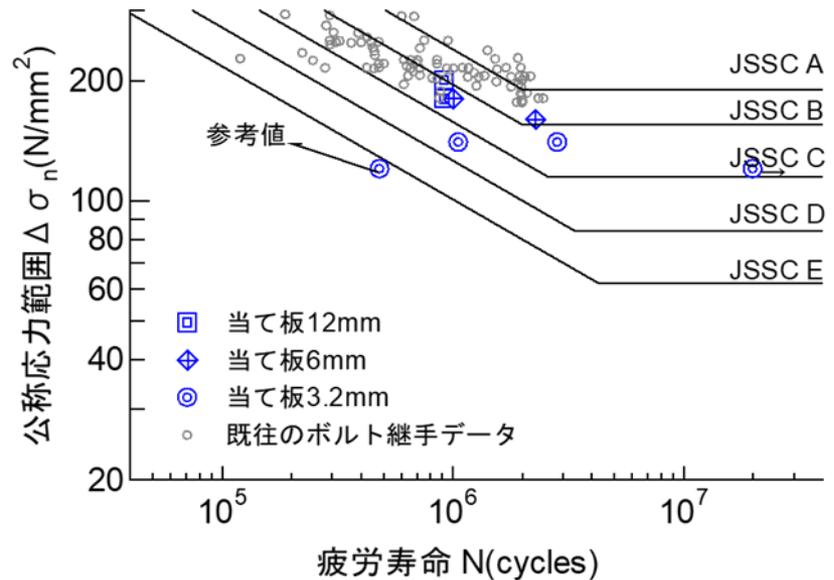


ボルト孔壁応力範囲で整理



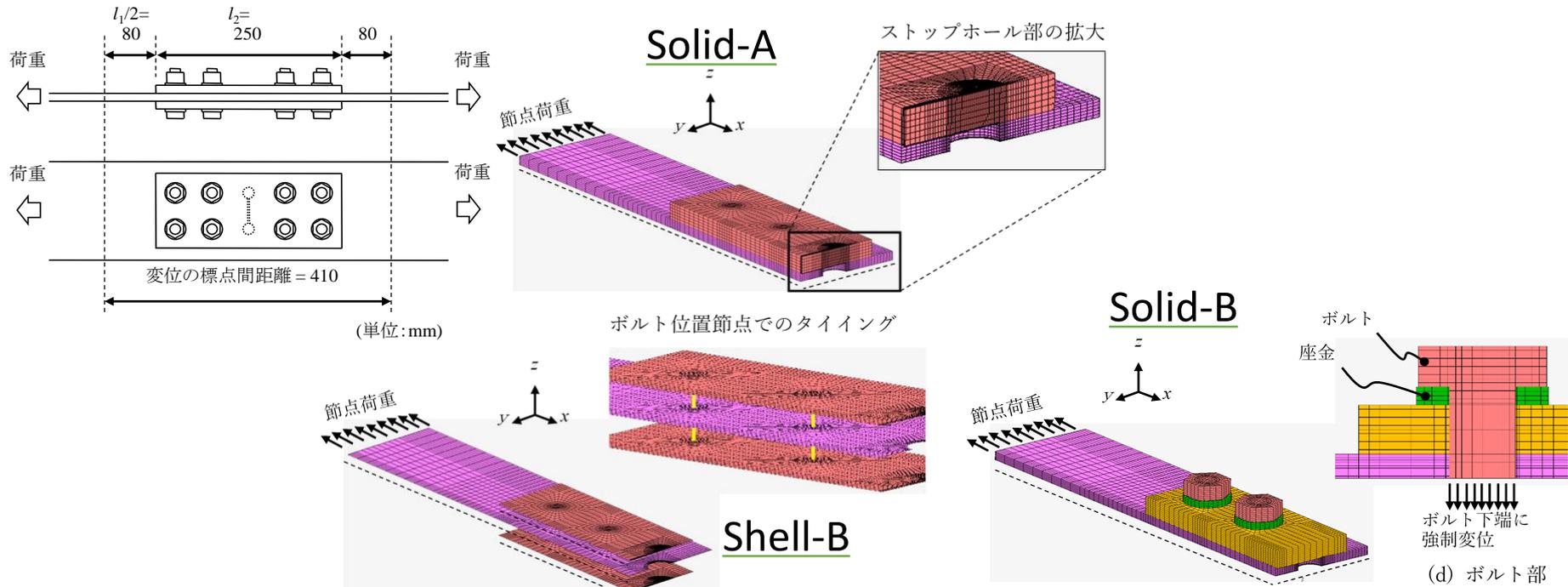
- ボルト孔近傍のフレッチングによりき裂が発生しており、高力ボルト継手の既往データと一致
- 当て板なしデータは残留応力なしの既往データと一致・・・残留応力を考慮した場合の当て板SHの疲労強度については次期課題

公称応力範囲で整理

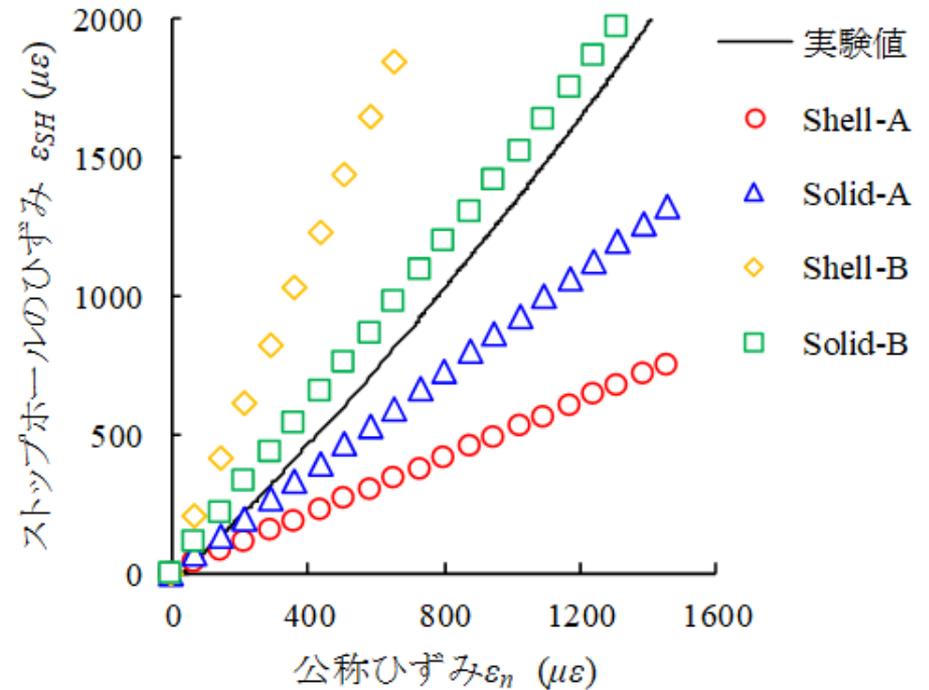
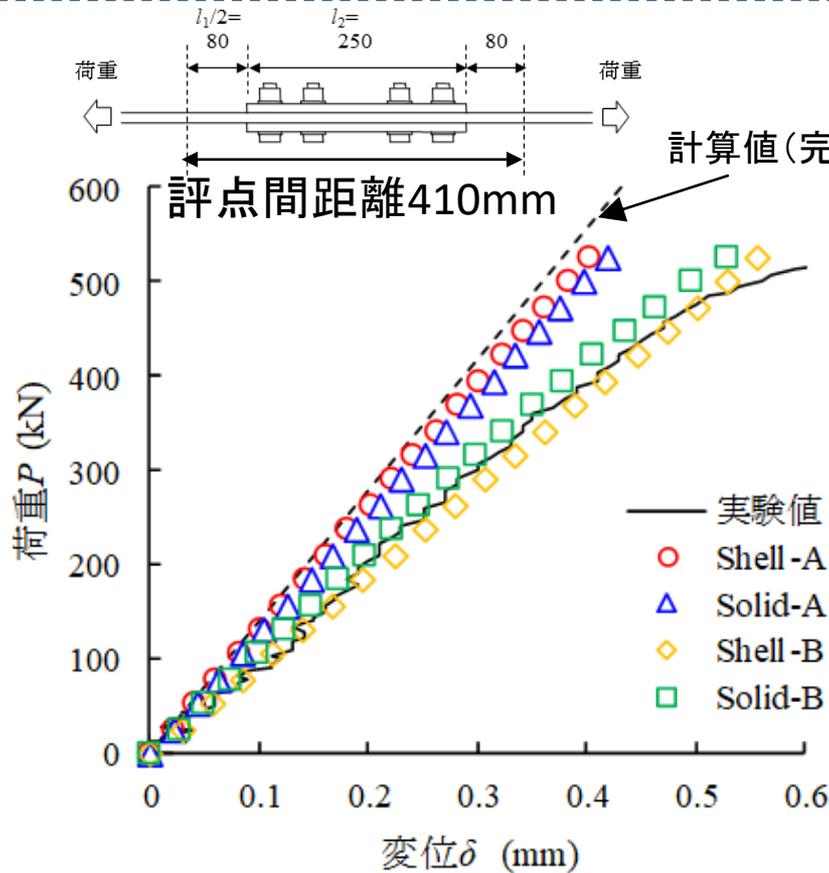


文献調査・ヒアリングに基づいた各種解析モデルの比較

解析条件	Shell-A	Solid-A	Shell-B	Solid-B
解析手法	線形静解析	線形静解析	線形静解析	非線形静解析
使用要素	4節点シェル	8節点ソリッド	4節点シェル	8節点ソリッド
当て板部のモデル化	当て板分の板厚を、 主板シェル要素の 板厚増加分 として モデル化	当て板と主板をソ リッド要素でモデ ル化、 接合面の節 点を共有	主板・当て板をそれ ぞれシェル要素でモ デル化	主板・当て板・ボルト・ 座金をそれぞれソリッド 要素でモデル化
ボルト孔のモデル化	なし	なし	なし	あり
摩擦係数	考慮せず	考慮せず	考慮せず	0.6(当て板の接合面) 0.4(その他)
ボルト・座金のモデ ル化	モデル化せず	モデル化せず	ボルト孔位置で剛な タイピング 、座金なし	モデル化する



検討結果(継手の変位・当て板応力・SHひずみ)



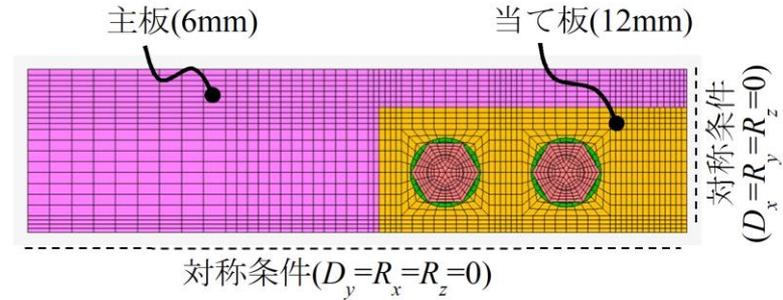
- Solid-A, Shell-Aは変位および当て板の応力分布が当て板と主板を完全合成させた計算値に近い
- Shell-B, Solid-Bは実験値に近い変位
- 当て板応力分布(参照ひずみも含め)はSolid-Bが実験値に近い

- Solid-A、Shell-Aでは当て板に流れる力が大きく、SHひずみを過小評価
- Solid-Bでは実験値とよく一致
- Shell-Bでは当て板に力があまり流れずSHひずみが大きくなる

簡易解析法の提案（補修設計の実務上簡易な手法が望ましい）

高度モデル(前頁Solid-B)

- ・ボルト、座金含めすべてソリッド要素
- ・接合面は摩擦を考慮
- ・材料非線形を考慮



対称条件($D_y=R_x=R_z=0$)

(a) 平面図



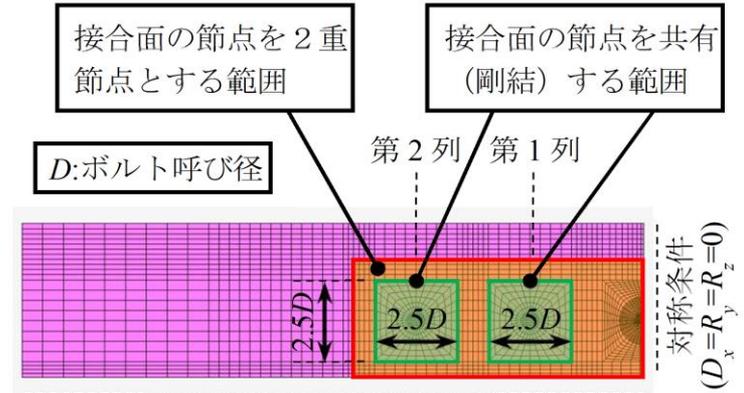
対称条件($D_z=R_x=R_y=0$)

(b) 側面図

高度モデルについては、パラメータの感度解析を実施

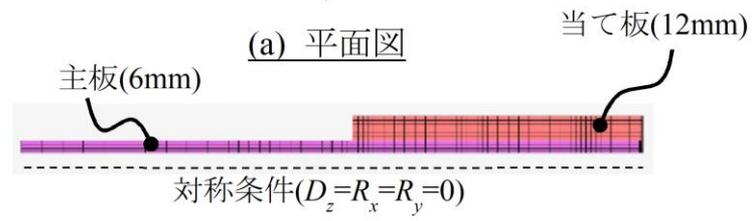
簡易モデル(前頁Solid-Aの節点共有範囲の変更)

- ・ソリッド要素でモデル化
- ・接合面のある範囲を節点共有
- ・材料線形(弾性解析)



対称条件($D_y=R_x=R_z=0$)

(a) 平面図



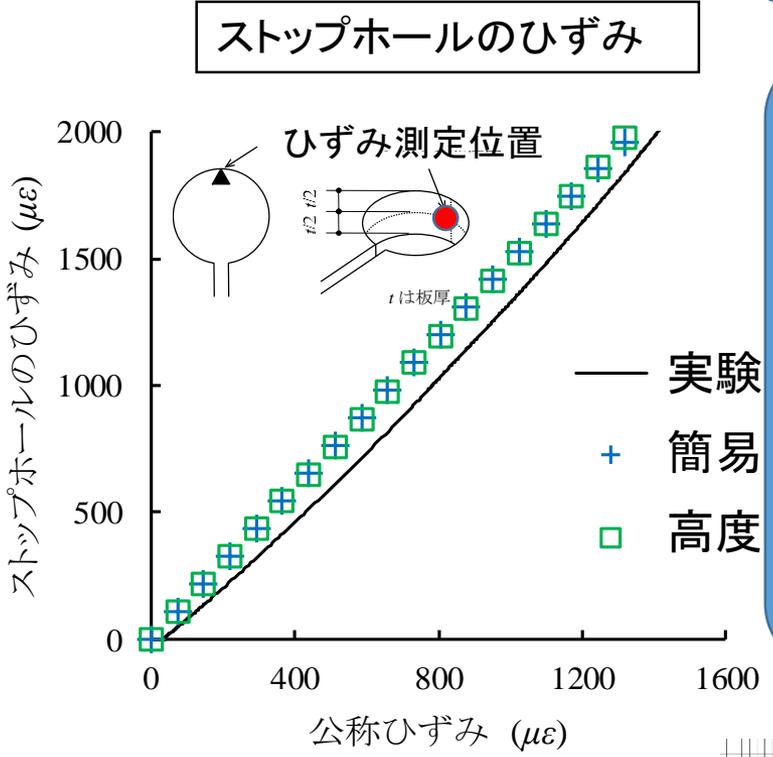
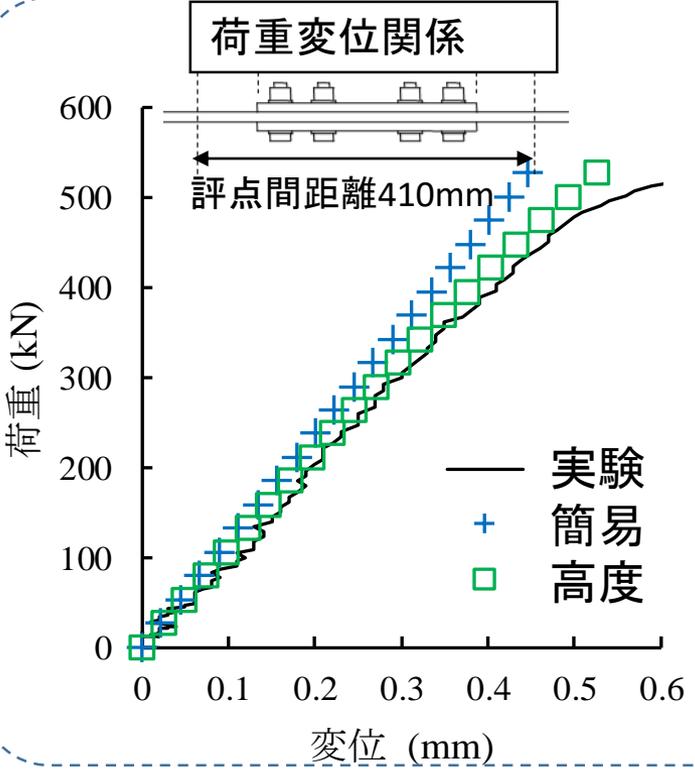
対称条件($D_z=R_x=R_y=0$)

(b) 側面図



主板と当て板の節点共有範囲の広さの影響についても検討している

検討結果(継手の変位・当て板応力・SHひずみ)



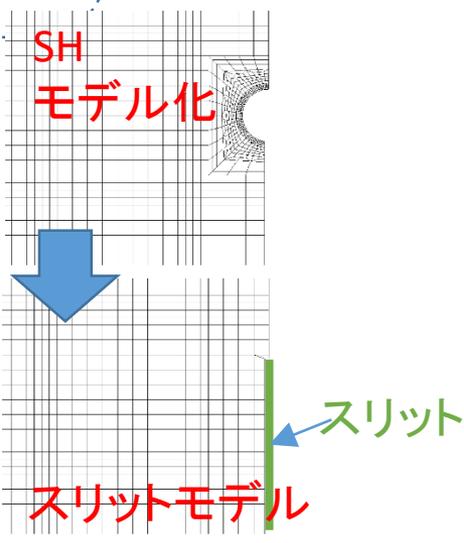
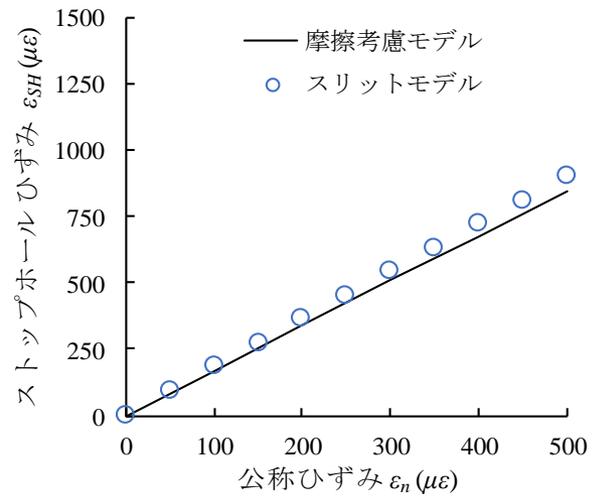
静的载荷試験データのある
・板厚・ボルトピッチ
・SHボルト締め有無
にケースも検証済

↓

更に形状パラメータを増やして、簡易モデルの適用性の検討を行っている

更に・・・SH部をモデル化せず

当て板上のひずみの解析結果
と
前部会提案の当て板参照ひずみ
とSHひずみの関係式
を用いて
SHひずみを良く推定できる



維持管理WGのまとめ

- 塗膜下の疲労き裂に対してUTを用いて1.5mm × 1.5mm程度のき裂を検知でき、見逃し・空振りも見られなかった

Future work

き裂のサイジングや検知限界となるき裂の大きさ

- 当て板補強に関して

1. 残留応力を導入していない当て板ありSHの疲労強度は非常に高く、当て板ボルト位置のフレットングにより破断

Future work

残留応力を導入した試験体による疲労強度の解明と当て板設計法の明示

2. 当て板下SH縁の応力を推定できる簡易なモデルを提案した

Future work

より実橋梁に近い応力場での推定式の適用性拡大

- 41年暴露した耐候性鋼材溶接継手の疲労試験を行った

Future work

耐候性鋼材のき裂検知に向けた検討が必要

ご清聴ありがとうございました