

新都市社会技術融合創造研究会

鋼床版の疲労耐久性向上に関する研究

プロジェクトリーダー：坂野昌弘（関西大学）

参加メンバー：

【産】日本橋梁建設協会、建設コンサルタンツ協会近畿支部、日本非破壊検査工業会、本四高速道路西日本高速道路、阪神高速道路

【官】国土交通省近畿地方整備局 道路部、和歌山河川国道事務所、兵庫国道事務所、近畿技術事務所

【学】関西大学、京都大学

研究の背景

長大橋梁や軟弱地盤上に架設される橋梁はもちろん地震の多いわが国では死荷重の低減が極めて有利であること、またプレファブ化が容易なために工期短縮が可能なことなどから、鋼床版に対するニーズは高い。

また、経年劣化したコンクリート床板を更新する際にも、軽量化による下部工への負担軽減と、交通規制を要する工期短縮の面から、鋼床版構造は極めて効果的である。

しかしながら、近畿管内の橋梁点検において、鋼床版縦リブと横リブの交差部等に疲労亀裂を多く確認していることから、鋼床版の疲労耐久性の向上が課題となっている。

研究の目的

本研究では、

鋼床版の縦リブと横リブの交差部や垂直補剛材上端部、デッキとUリブの溶接部等を対象として、

既設鋼床版に対しては現在の補強工法よりもさらに高性能な工法を、

また新設あるいは更新用の鋼床版については現在の疲労問題を根本的に解決できるような新しい構造をそれぞれ提案し、

解析や疲労実験によってそれらの耐久性を検証、

最終的にはそれらの工法や構造を実橋に適用して

疲労耐久性の向上効果を検証することを目的とする。

研究内容 ①

既設橋に対しては、

従来Uリブ側に用いられてきた摩擦接合型のワンサイドボルトの問題点である

Uリブ内面の摩擦面の品質保証が不要で、密閉性も確保でき、かつデッキ上面の舗装も傷めない

支圧接合型の新型ワンサイドボルト(TRS)を用いた補強工法を提案し、

解析や疲労実験によりその疲労耐久性を検証する。

TRS: 水密性(6気圧)、気密性(0.1気圧)検証済！

引き抜き強度≧10tonf(Φ16、板厚12mm)！

研究内容 ②

新設およびRC床版等の更新用鋼床版に対しては、
水密性とデッキ上面の平坦性を確保できる

支圧接合型の新型ワンサイドボルト(TRS)を用いて、
疲労上の弱点となる溶接接手を使用しない構造を提案することにより、

従来の鋼床版の疲労問題を根本的に解決する。

これらの構造に対しても解析や疲労実験を行い、疲労耐久性を検証する。

研究内容 ③

①および②で疲労耐久性を検証した補強工法と新しい構造を実際の橋梁で適用し、

既設橋に対しては補強前後の実働応力計測により、

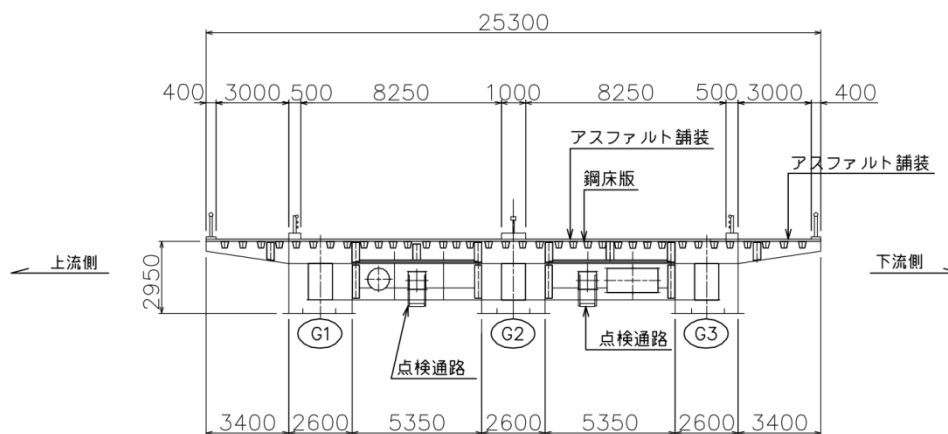
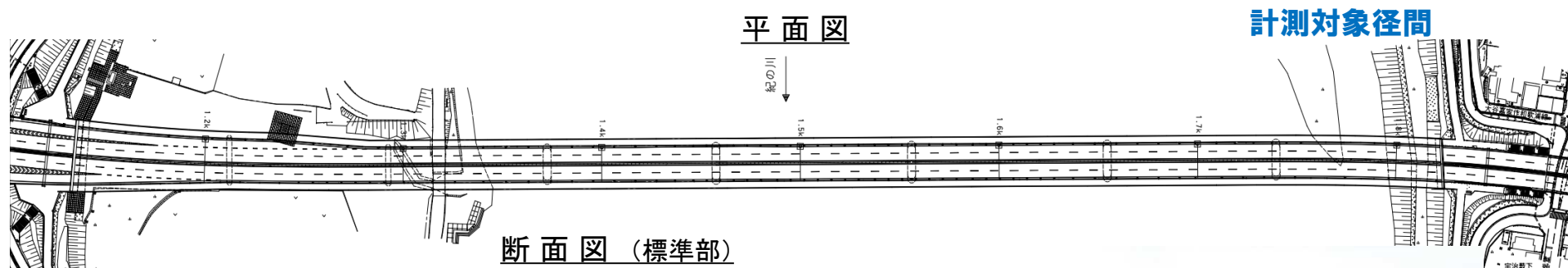
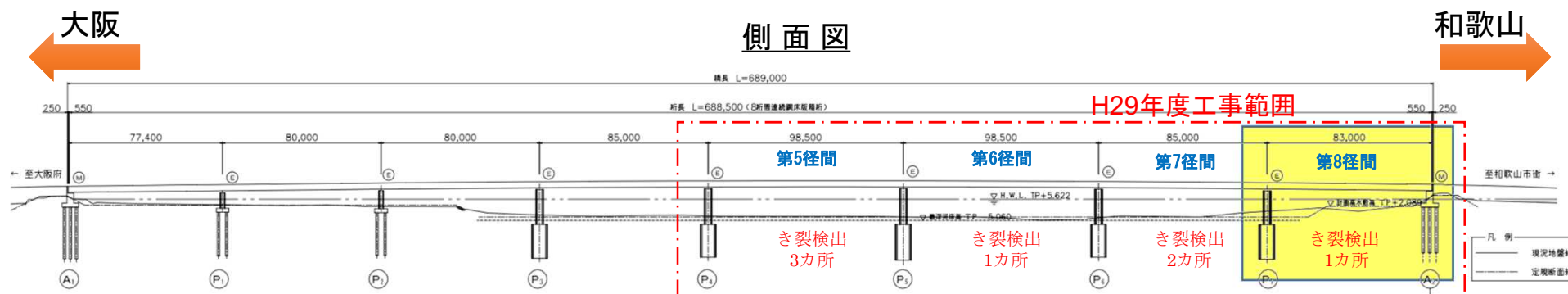
新設橋や更新用の鋼床版に対しては設置後の実働応力計測により、

それらの有効性を検証する。

(→新設・更新用についてはフィールド募集中！)

对象桥梁

紀の国大橋（8径間連続鋼床版箱桁）



平成15年3月 竣工

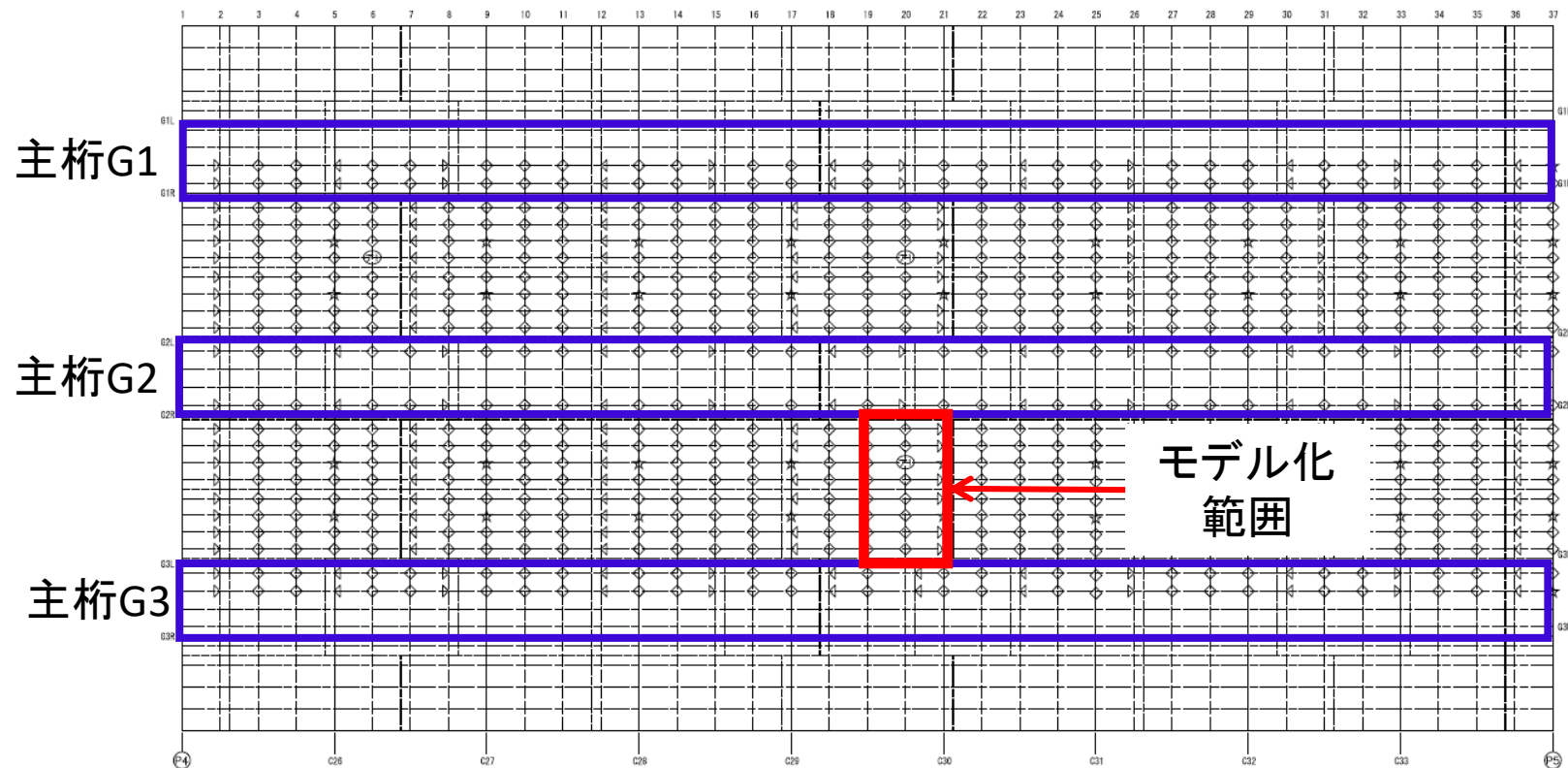
① FEM解析

①-1 Uリブと横リブの交差部

①-2 垂直補剛材上端部

実橋モデルの選定範囲

- き裂の発生数が最も多かったP4-P5径間のうち、き裂が発見された、主桁G2-G3間の支間中央付近をモデル化する。
- モデル化する範囲は影響線長を考慮して、主桁間のUリブ8本、横リブ3本分の範囲とする。

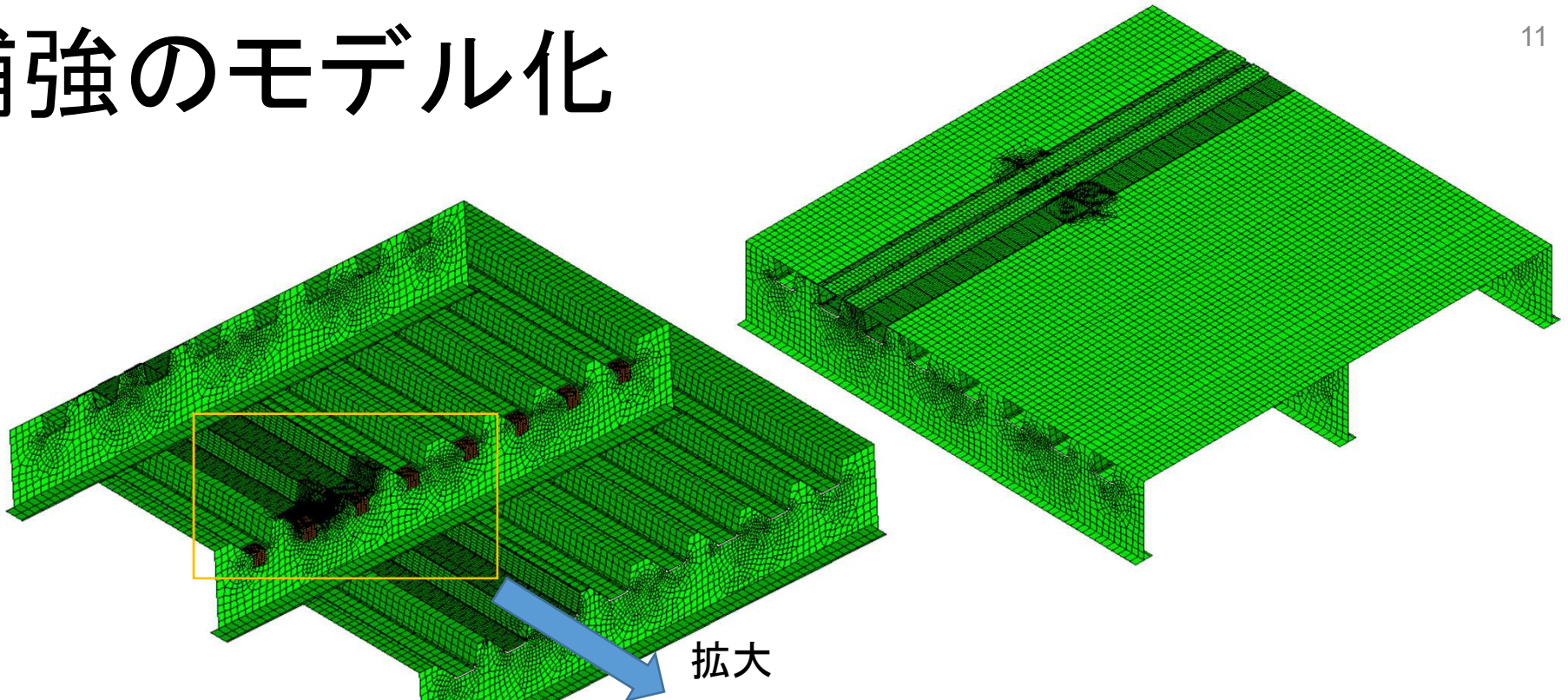


①-1 Uリブと横リブの交差部

【既設橋の補強】

補強のモデル化

11

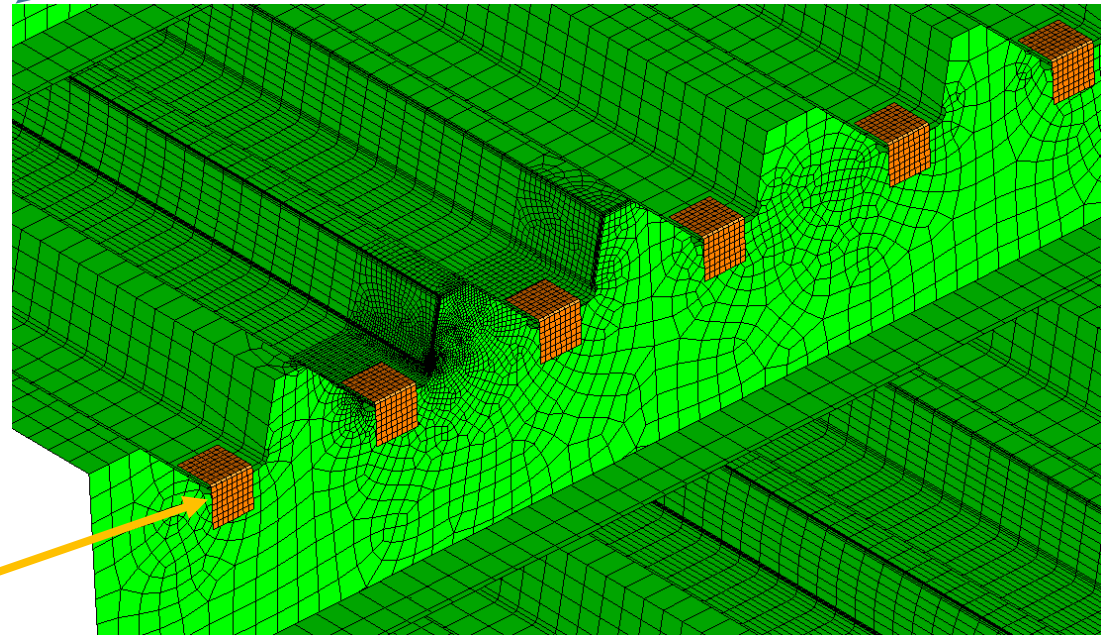


拡大

G1桁から2本目のUリブに着目

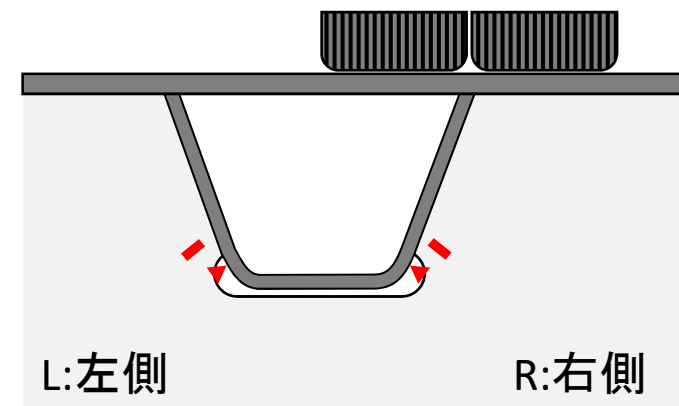
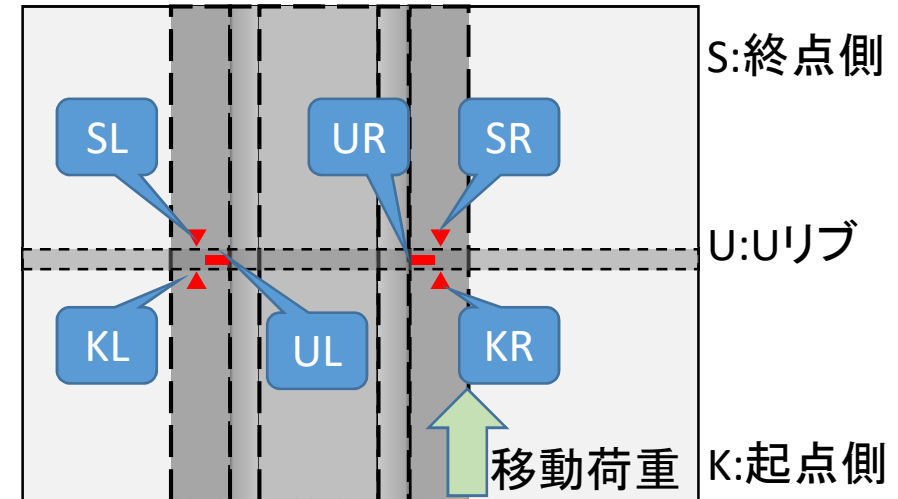
アングル材をモデル化
→ Uリブと横リブに固定
(解析ソフトのTie機能を使用)

補強アングル



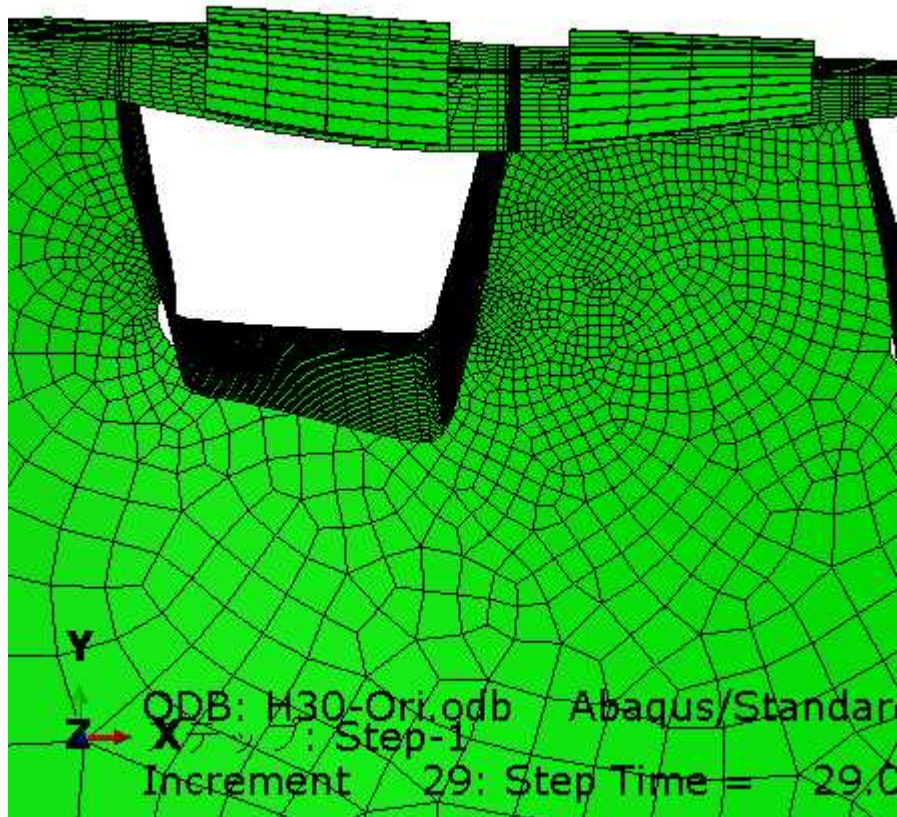
着目位置(ゲージ)名称

着目箇所6か所について
右図の様に命名

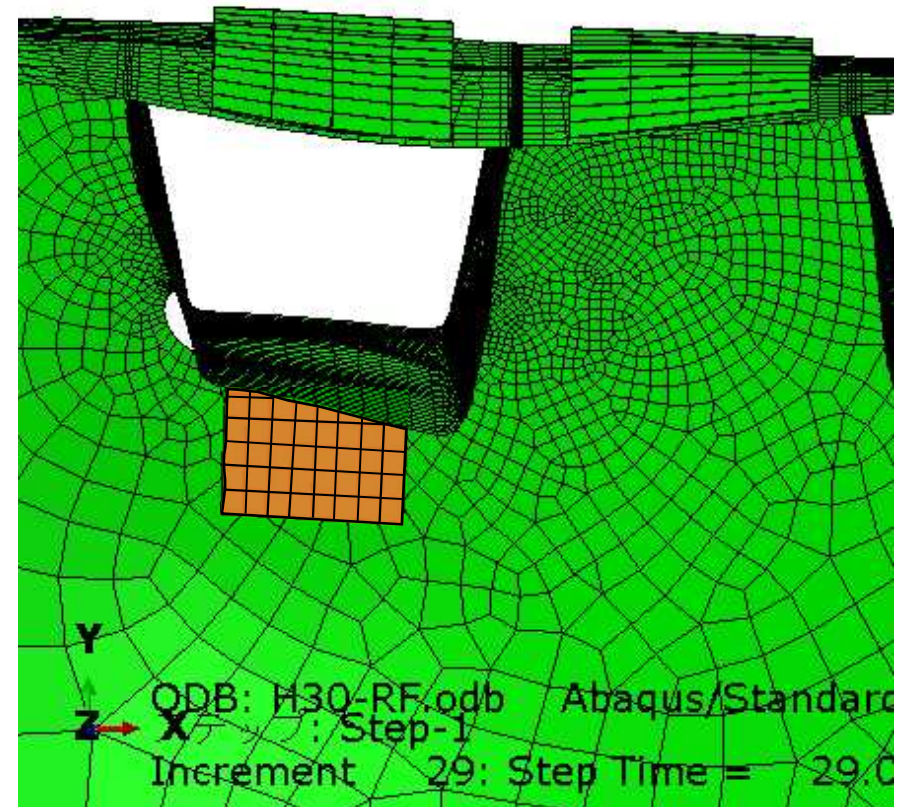


変形図 (Uリブの応力最大時)

載荷位置：横リブから1240mm起点側



補強前

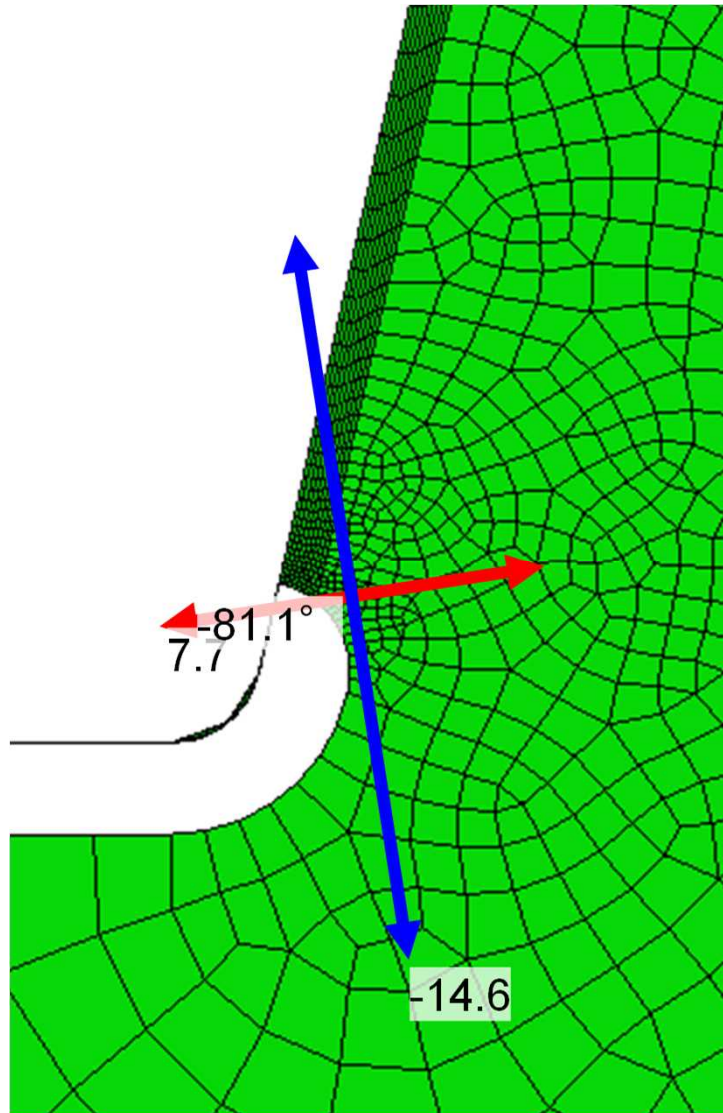


補強後

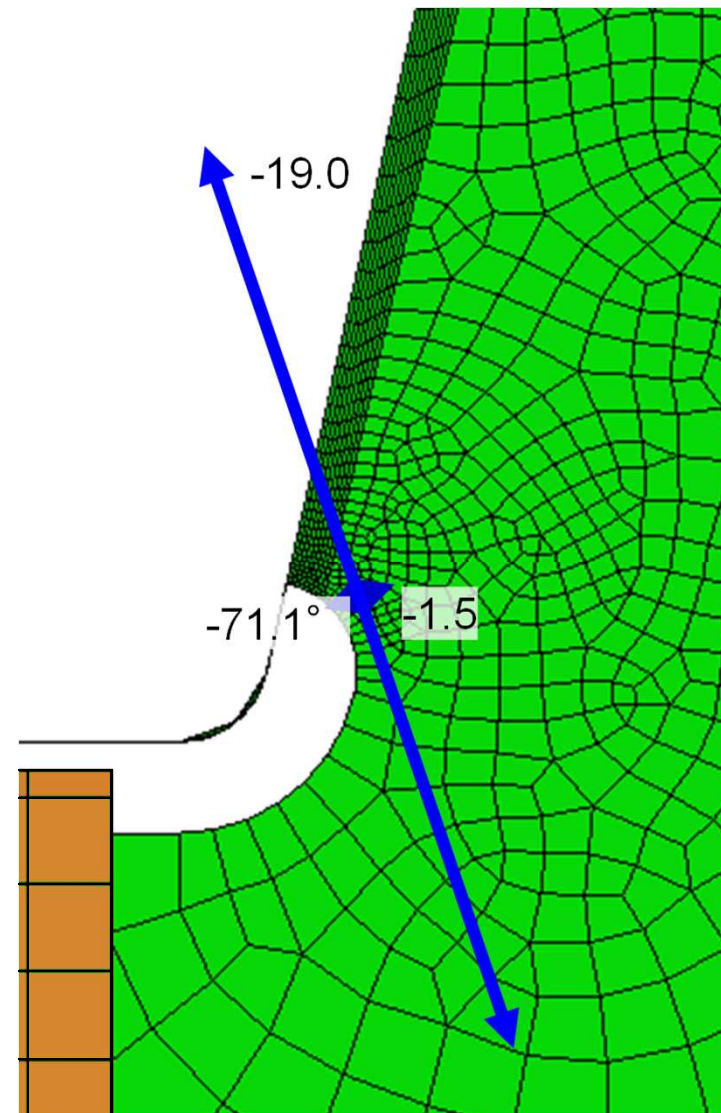
主応力の比較 KR

載荷位置：横リブから1340mm終点側（最大主応力ピーク位置）

補強前



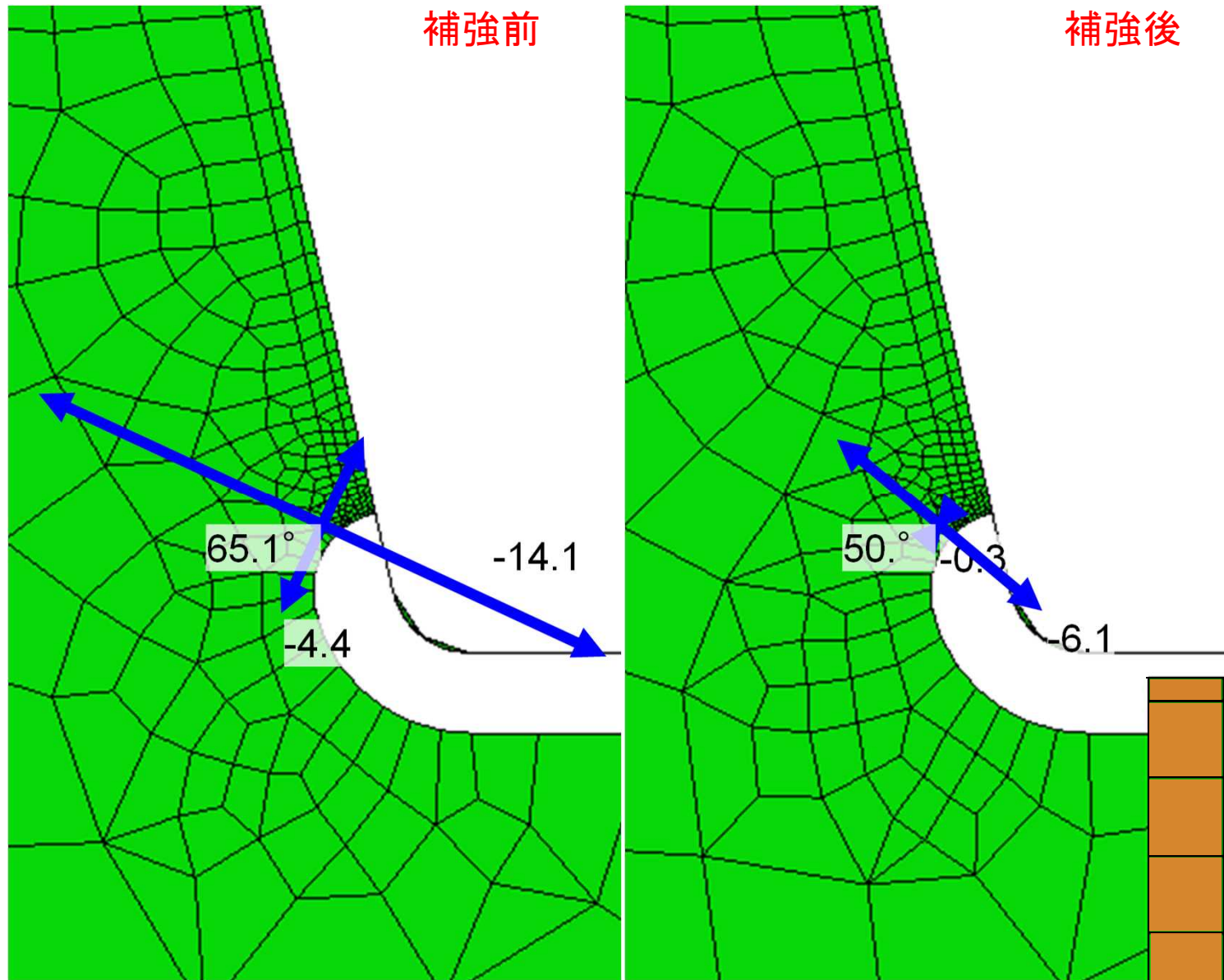
補強後



主応力の比較 KL

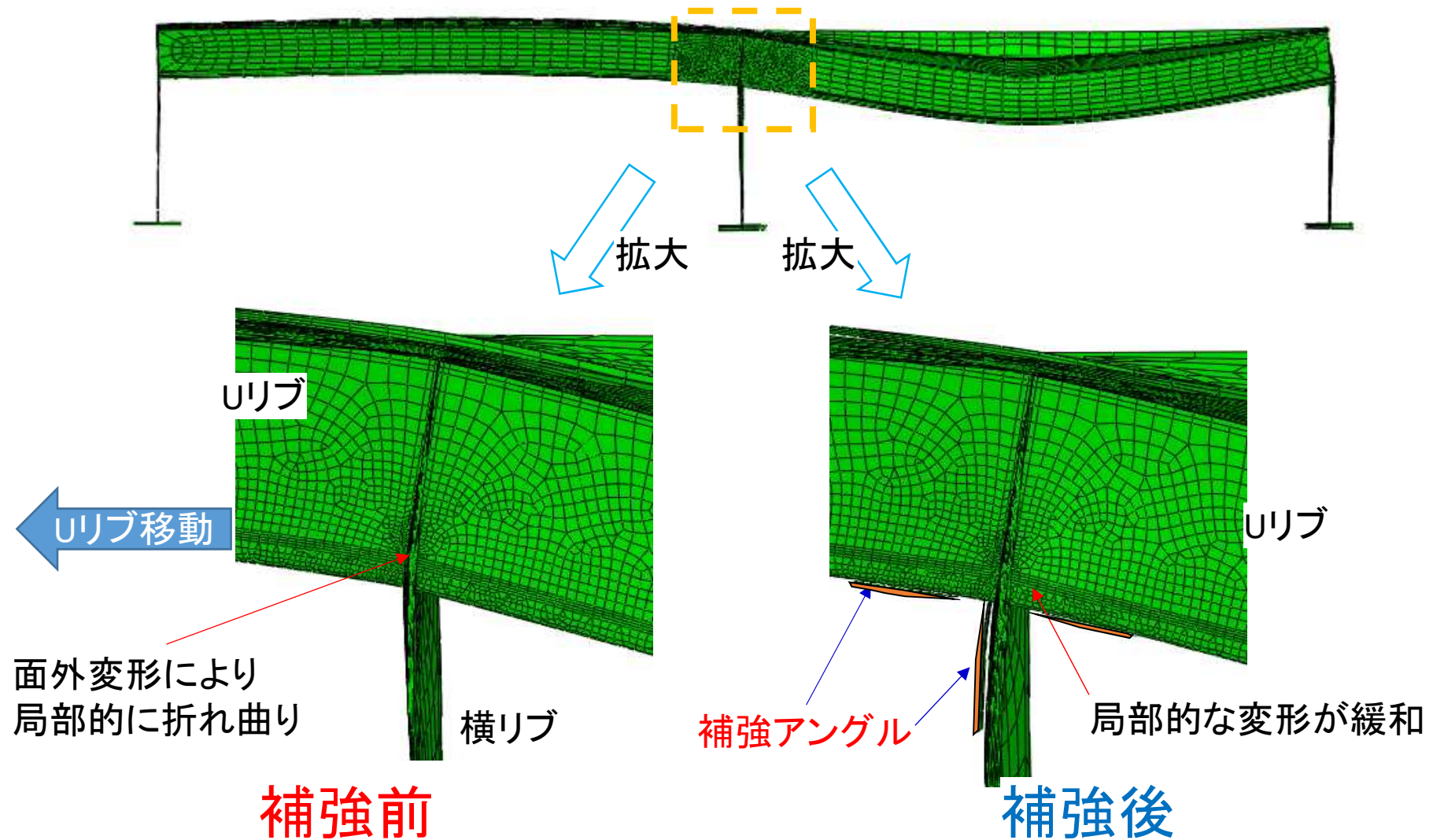
15

載荷位置：横リブから1390mm終点側(最大主応力ピーク位置)

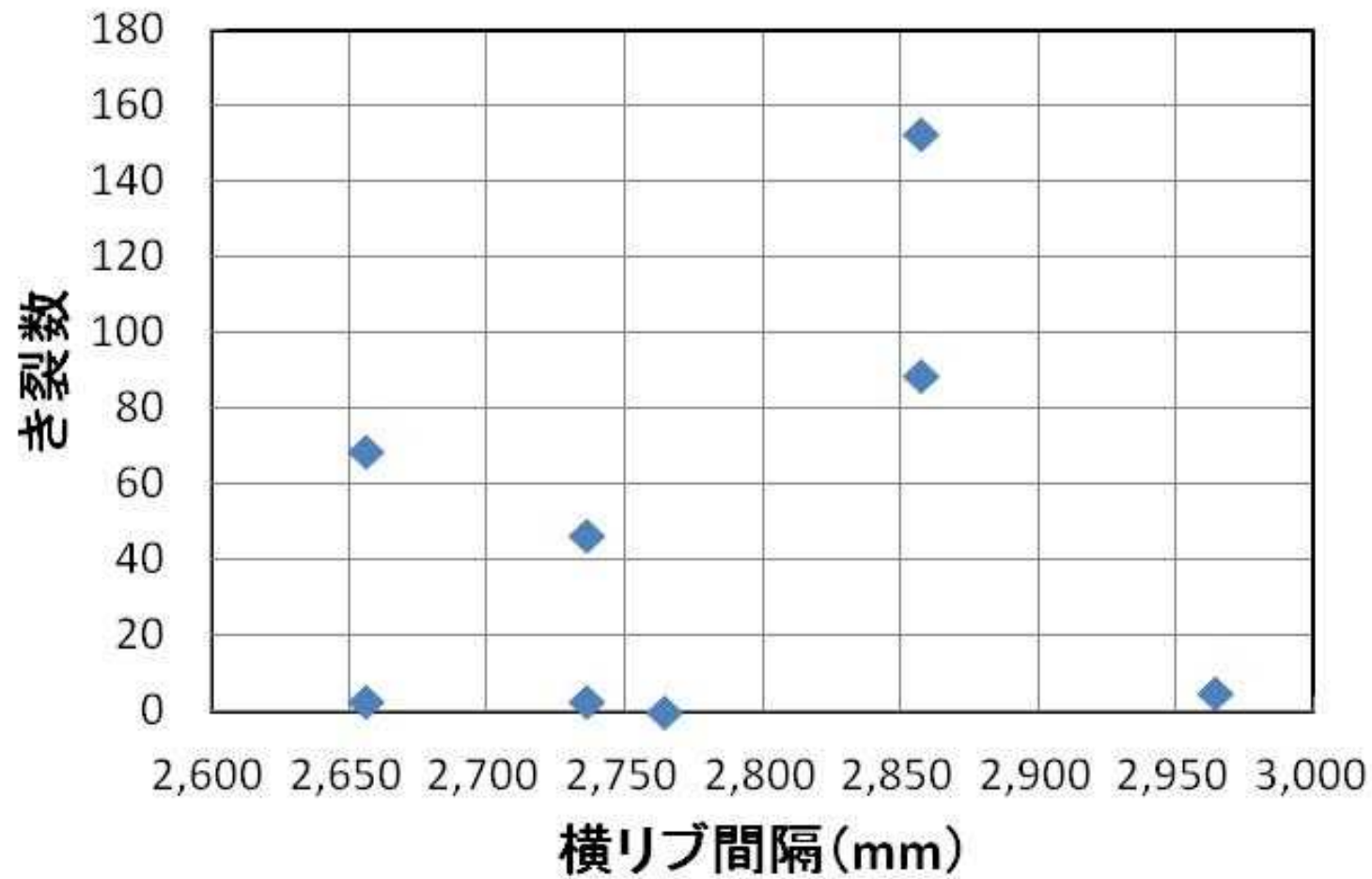


変形図 (KR部応力着目時)

載荷位置：横リブから1290mm終点側

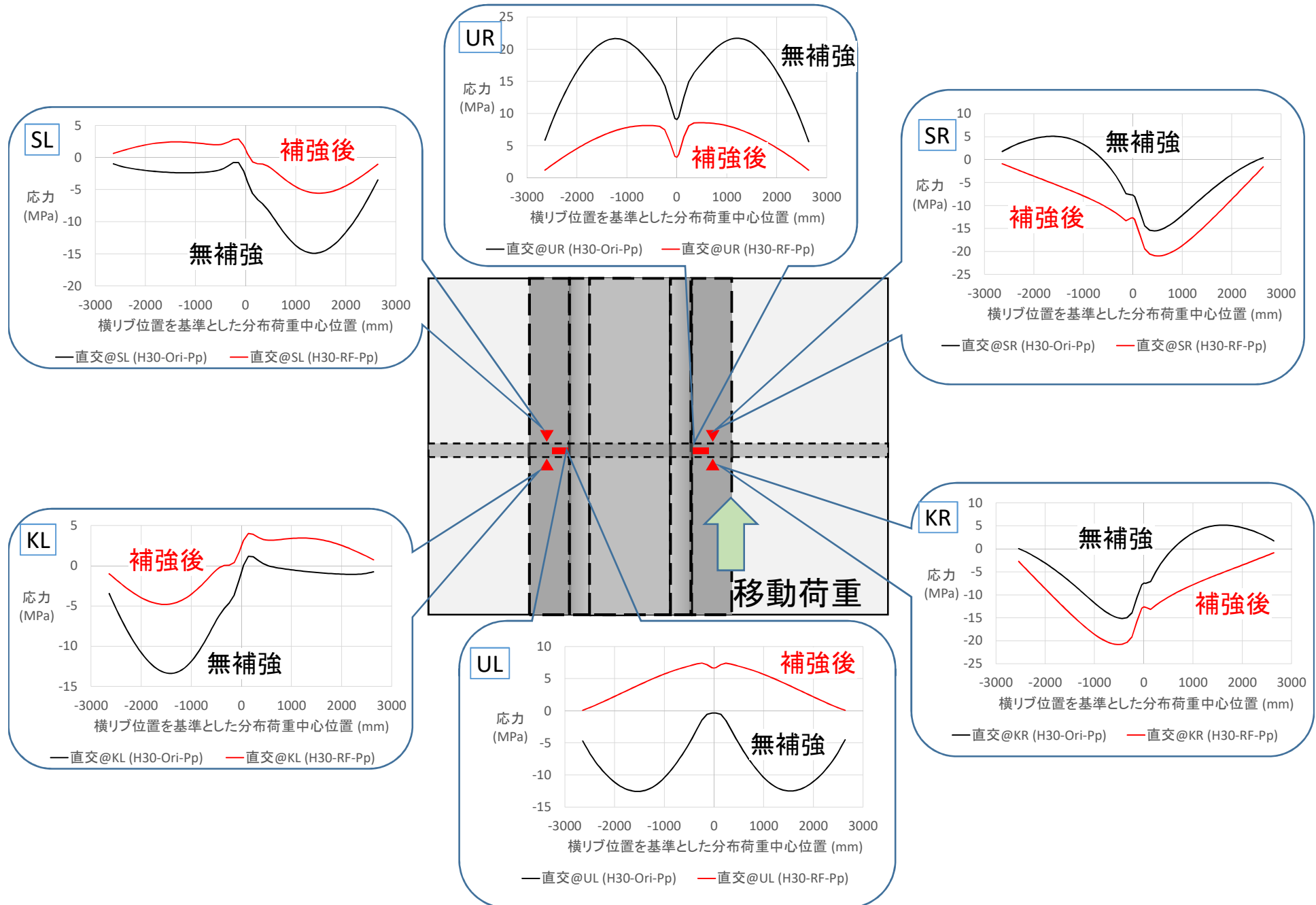


横リブ間隔 × き裂数



補強効果 – 溶接線直交方向応力による比較

18



解析結果まとめ(Uリブと横リブの交差部)

19

アングル補強により、

横リブスロット部のUリブ下フランジの
橋軸および橋軸直角方向の水平方向の動きを抑制



Uリブと横リブを固定する溶接部の局部応力を低減



疲労き裂発生を予防！

①-2 垂直補剛材上端部

【新設・更新用構造】

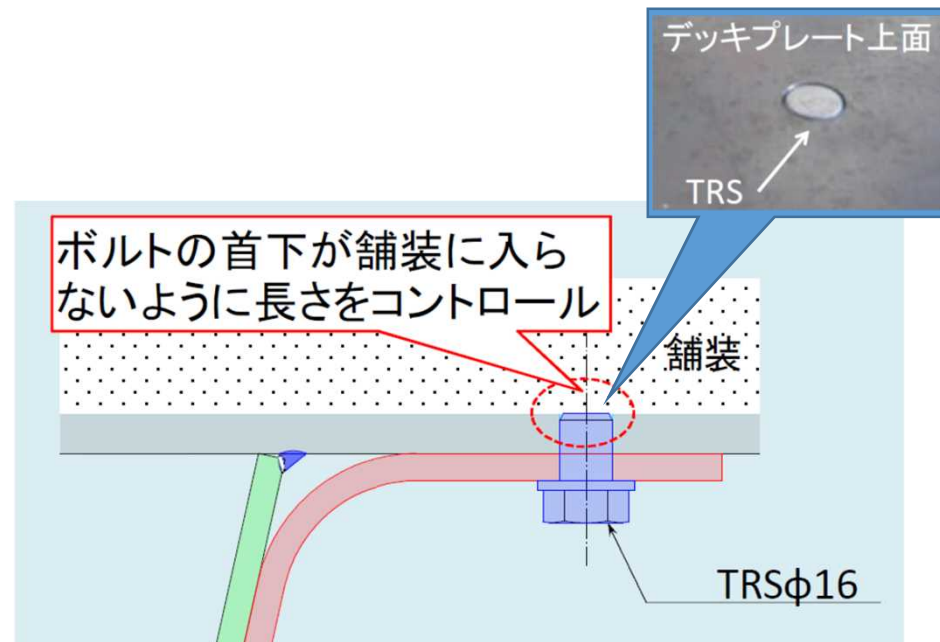
新設・更新構造における改良点

- ① TRSを用いたデッキとUリブの接合構造
- ② TRSを用いたUリブと横リブの接合構造
- ③ 切欠きによる垂直補剛材上端部の応力緩和

※TRS (Thread Rolling Screw)

タッピング型ワンサイドボルト

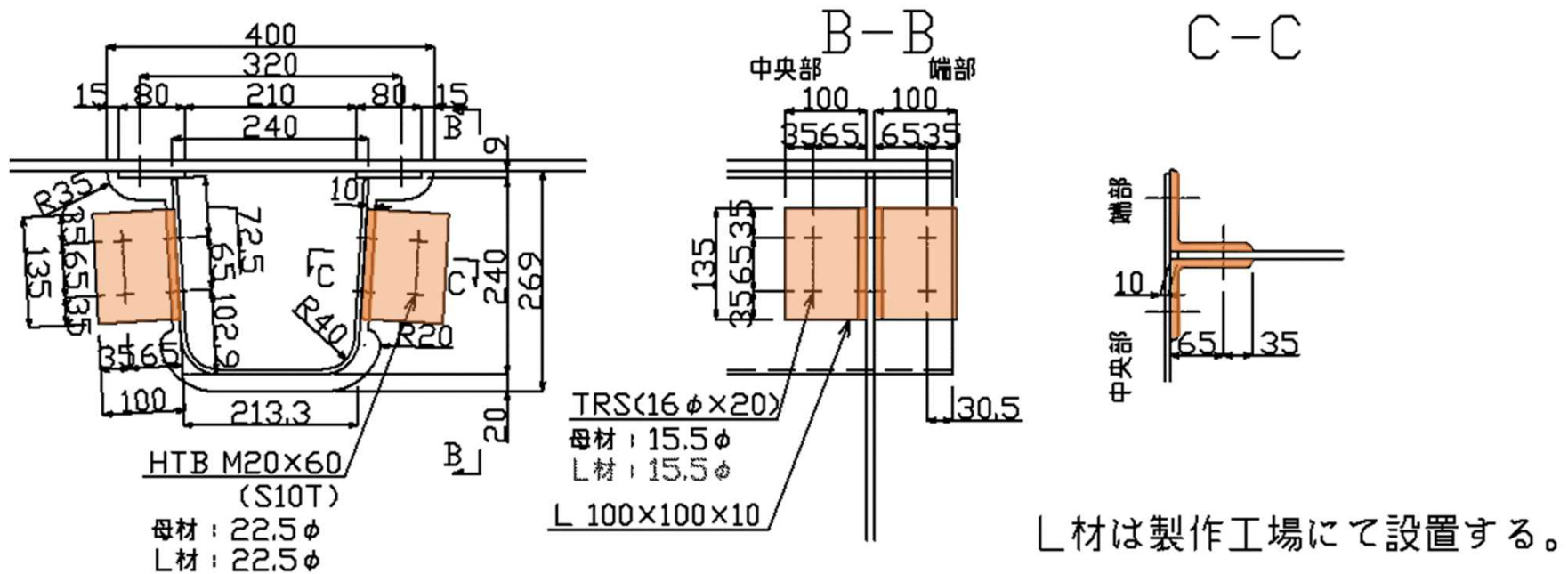
φ16



(2016 建設技術展 資料より) 21

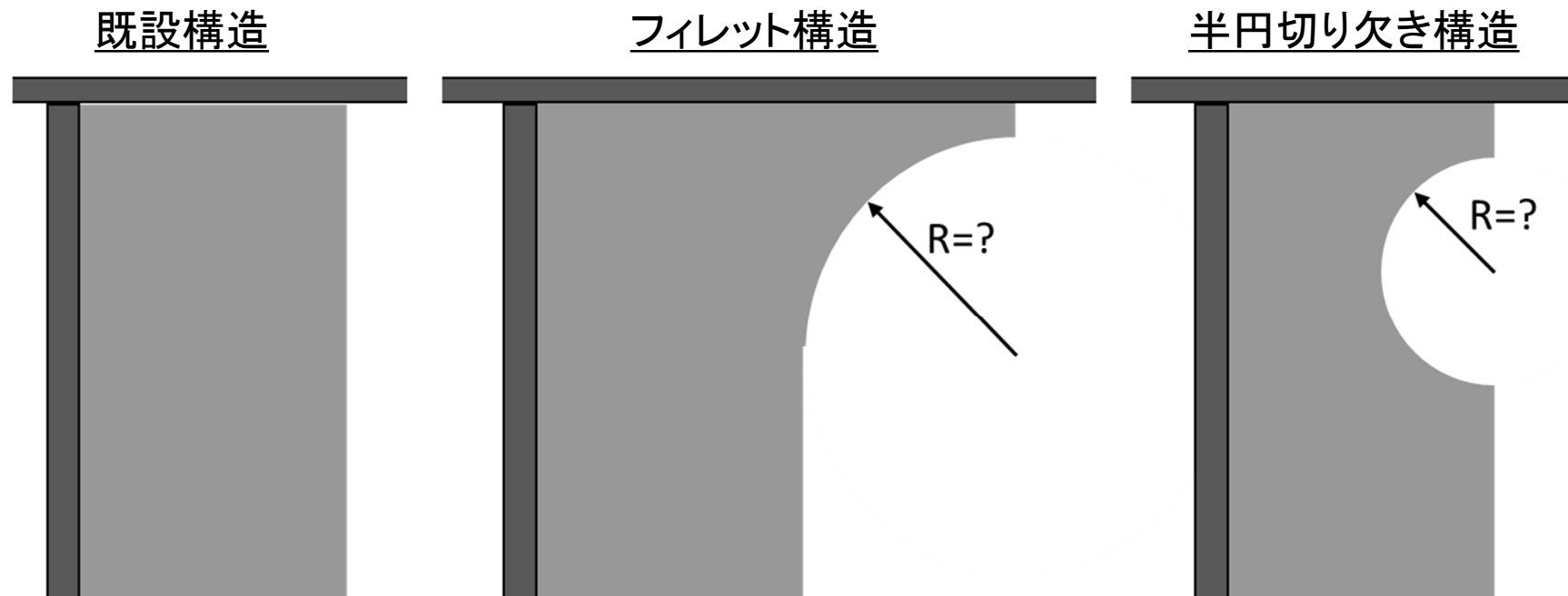
2)溶接を用いないUリブと横リブの接合構造

- アングル材を高力ボルトとTRSで接合する.
- Uリブ側は密閉構造のためTRSを使用する.

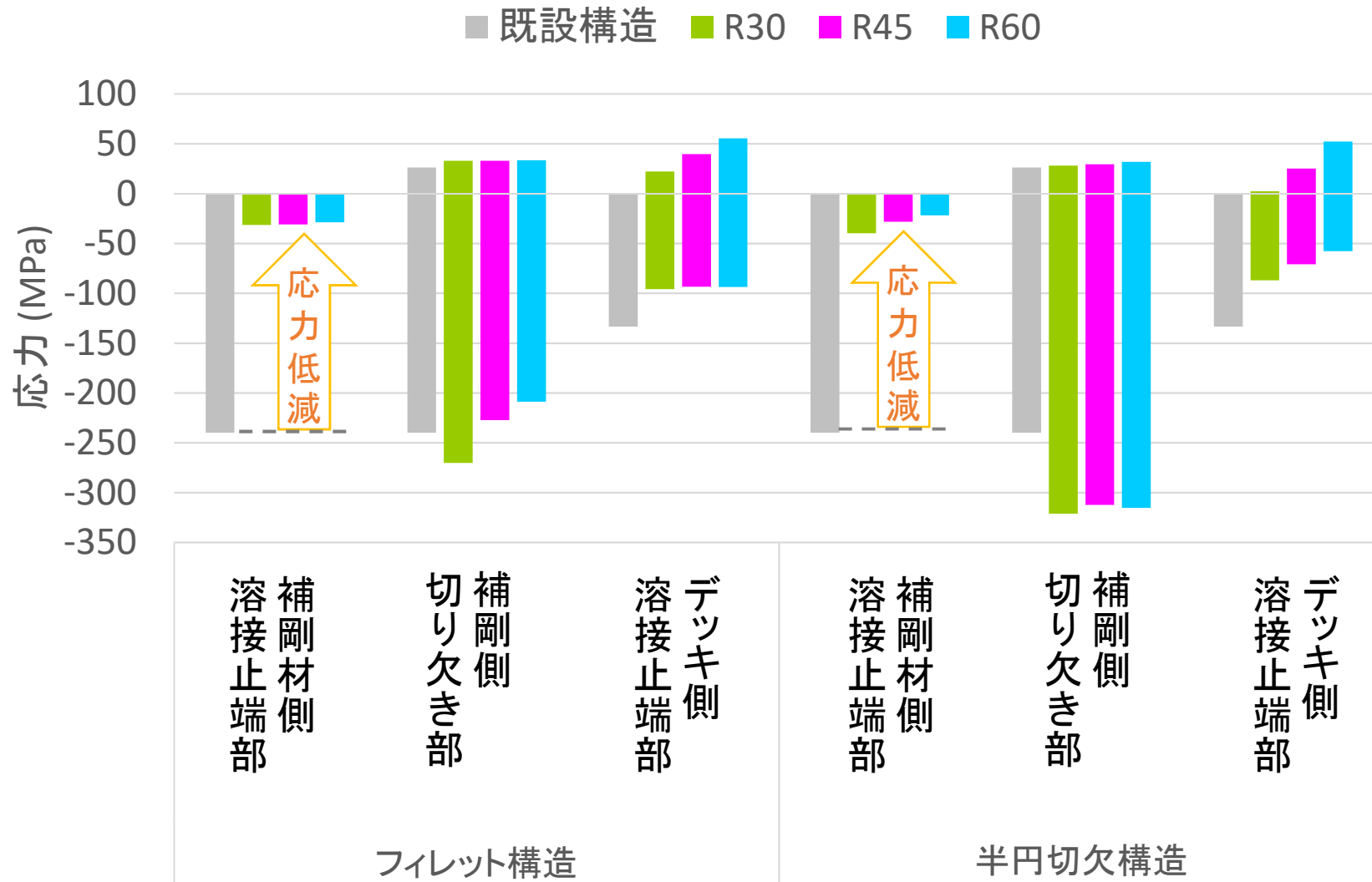


3) 垂直補剛材上端の疲労き裂防止構造

- 既往の検討を参考に，以下2種類を選定．Rはパラメータとして考慮
 - ① **フィレット構造**
 - ② **半円切り欠き構造**



応力比較のまとめ



垂直補剛材上端検討まとめ

応力評価位置①: 垂直補剛材コバ面

- 上端溶接止端部は両補強とも効果大
 - フィレット: $-240\text{MPa} \rightarrow -32\text{MPa} (\div 1/8)$
 - 半円切り欠き: $-240\text{MPa} \rightarrow -40\text{MPa} (\div 1/6)$
- 補剛材母材のコバ面R部の圧縮応力度

	フィレット	<	半円切り欠き
• R30	-270 MPa	<	-321 MPa
• R45	-228 MPa	<	-312 MPa
• R60	-209 MPa	<	-316 MPa

応力評価位置②: デッキ下面溶接止端部

- 引張応力度: Rが大きくなるほど増加
 - フィレット: $22\text{MPa} \rightarrow 40\text{MPa} \rightarrow 56\text{MPa}$
 - 半円切り欠き: $2\text{MPa} \rightarrow 25\text{MPa} \rightarrow 52\text{MPa}$
- 圧縮応力度
 - フィレット: Rに寄らずほぼ同等 (R30: -96 MPa, R45: -94 MPa, R60: -94 MPa)
 - 半円切り欠き: Rが大きくなるほど低下 (R30: -87 MPa, R45: -71 MPa, R60: -58 MPa)

総合的に判断すると, 半円切り欠き・フィレット共にR=30mmが良い

② 疲労実験

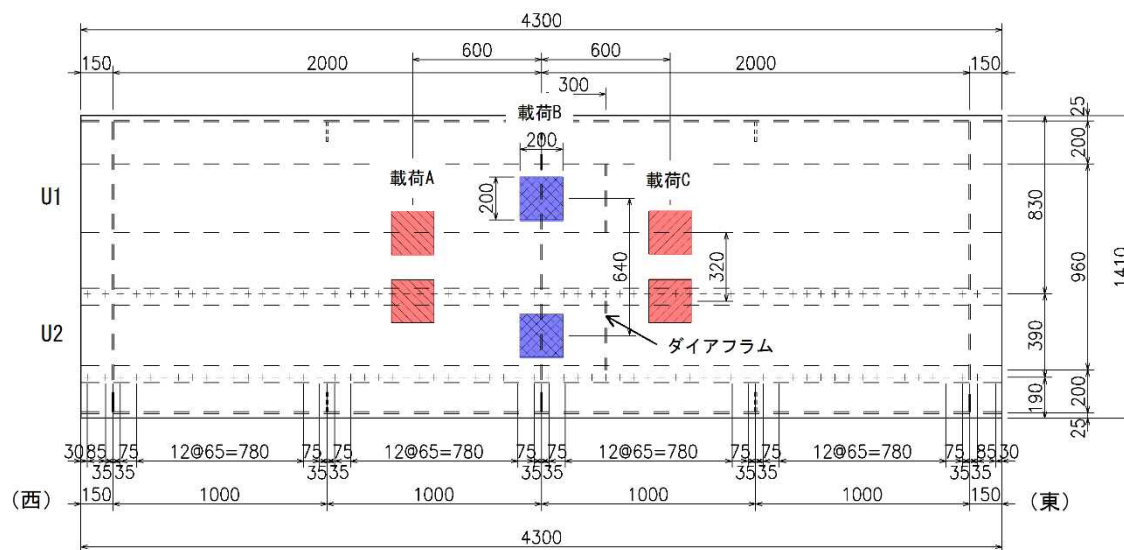
②-1 Uリブと横リブの交差部

②-2 垂直補剛材上端部(既設の補強)

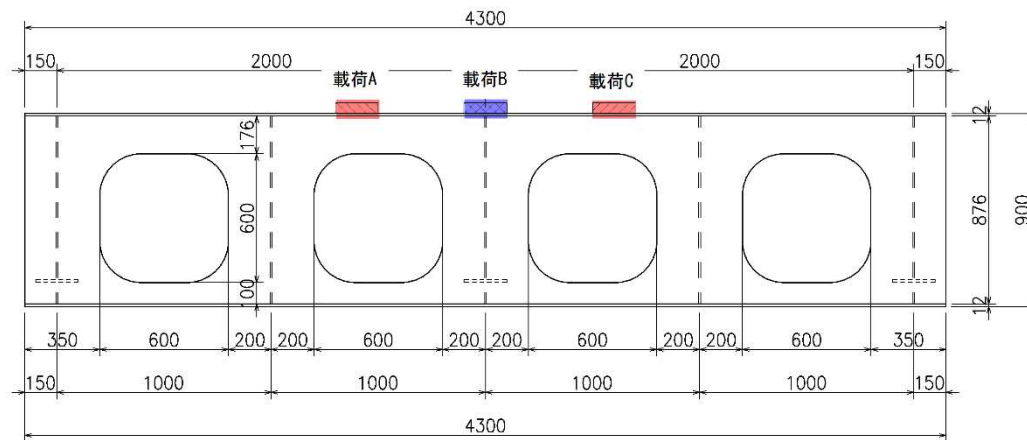
②-3 垂直補剛材上端部(新設・更新用)

②-1 Uリブと横リブの交差部

試験体の形状と寸法， 載荷位置

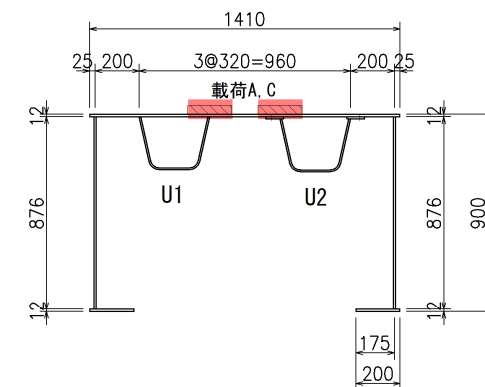


平面图

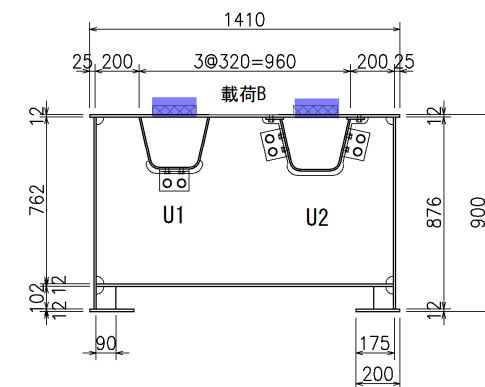


側面図

(単位: mm)



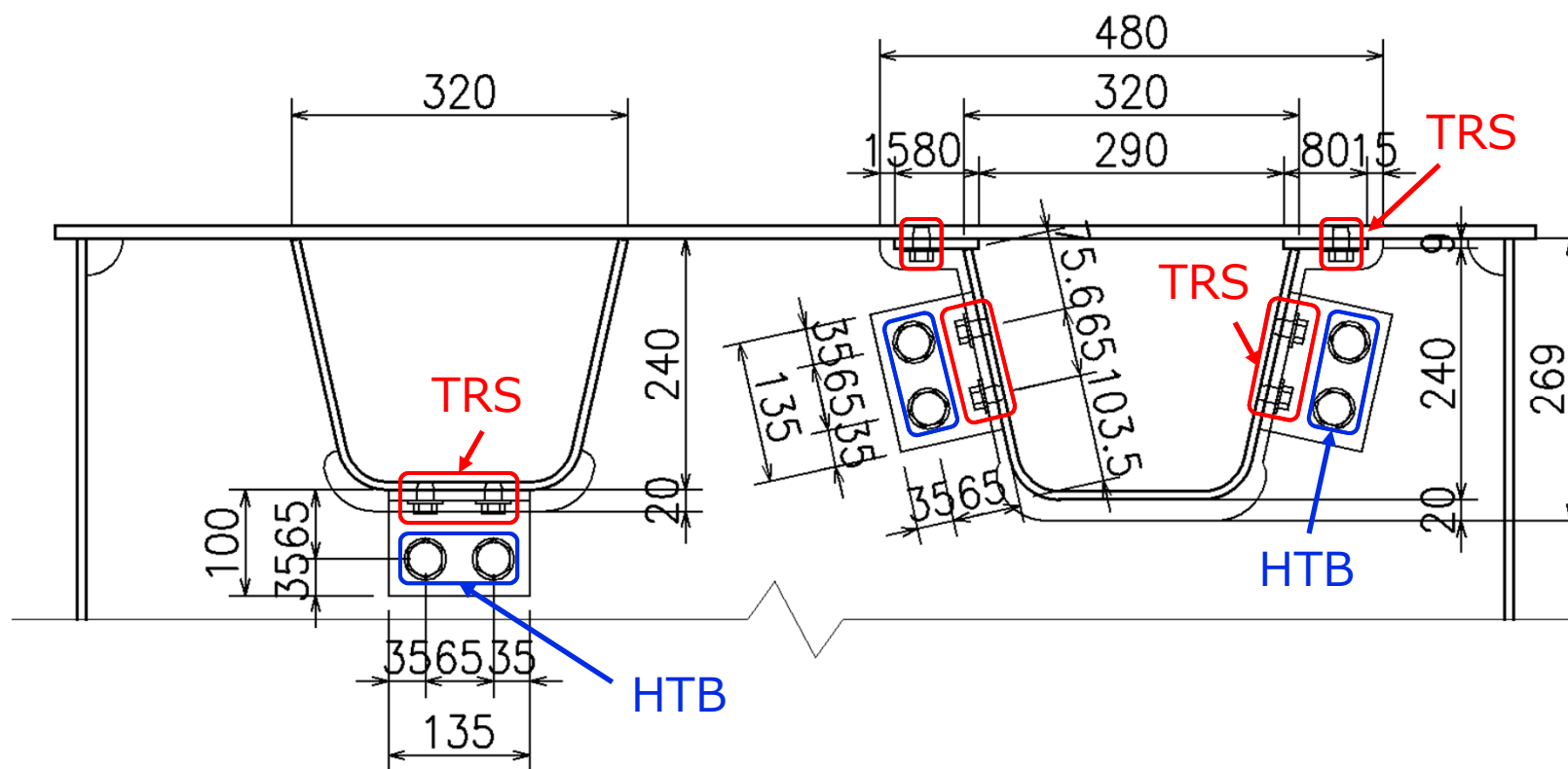
断面図（支間部）



断面図（横リブ交差部）

Uリブ-横リブ交差部詳細

(単位：mm)



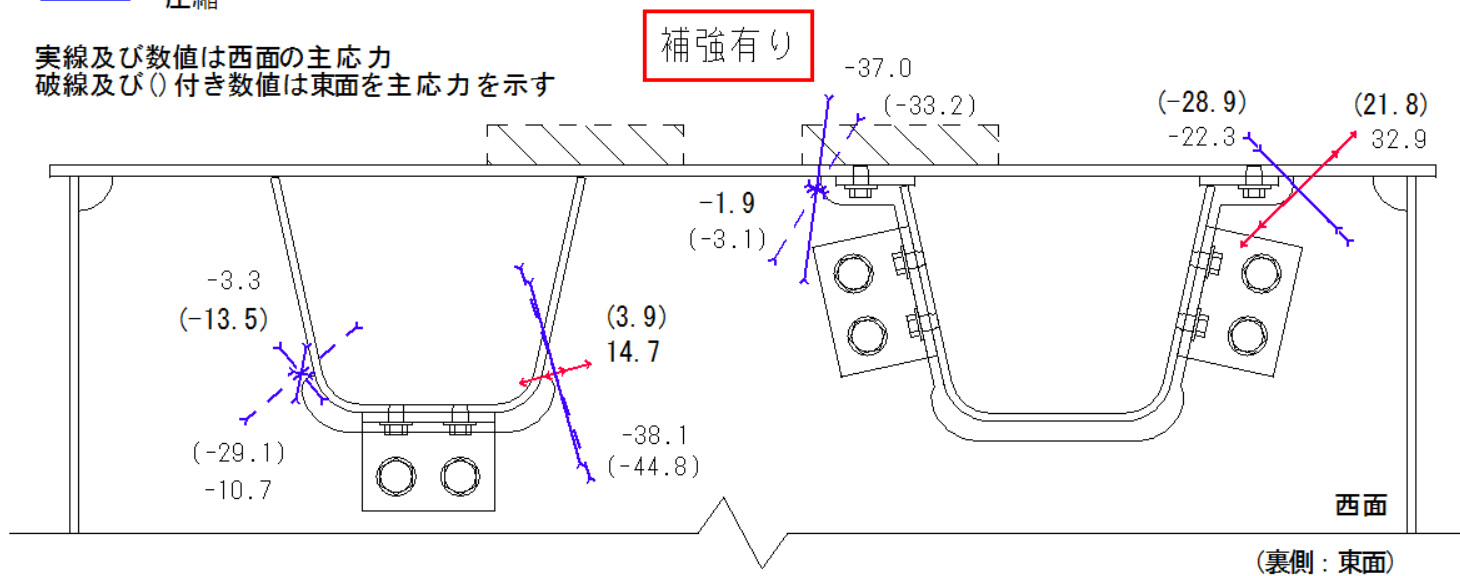
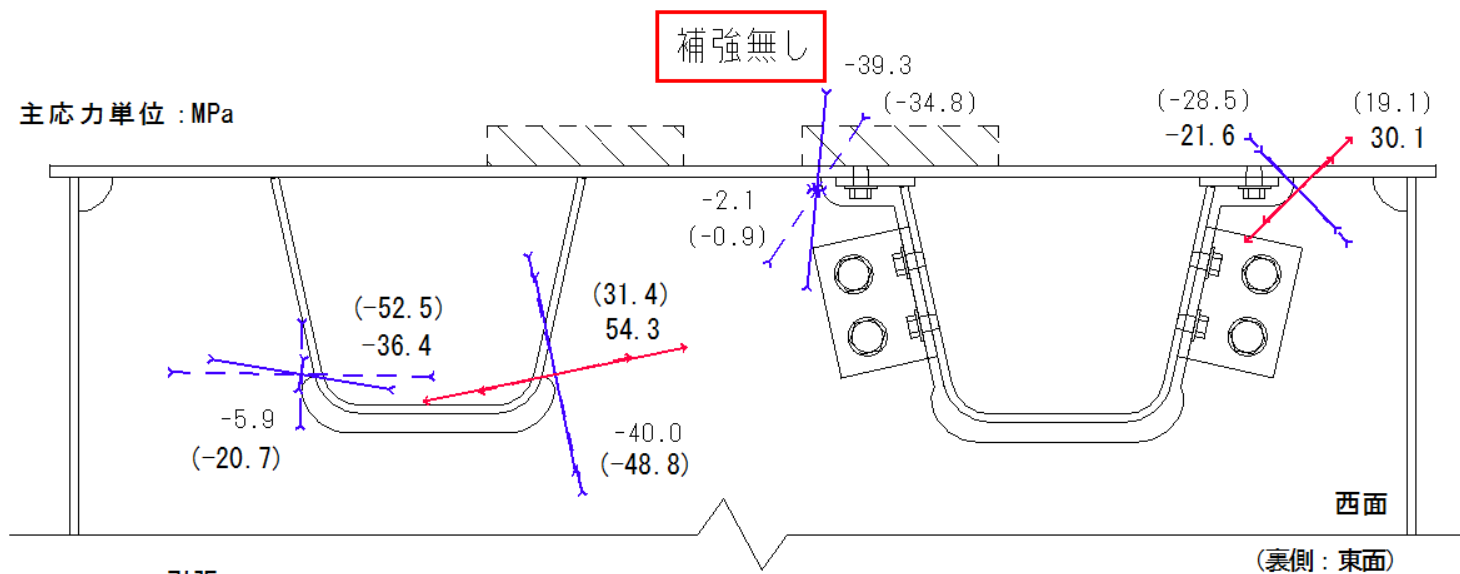
従来構造+補強 (U1)

新設・更新用構造 (U2)

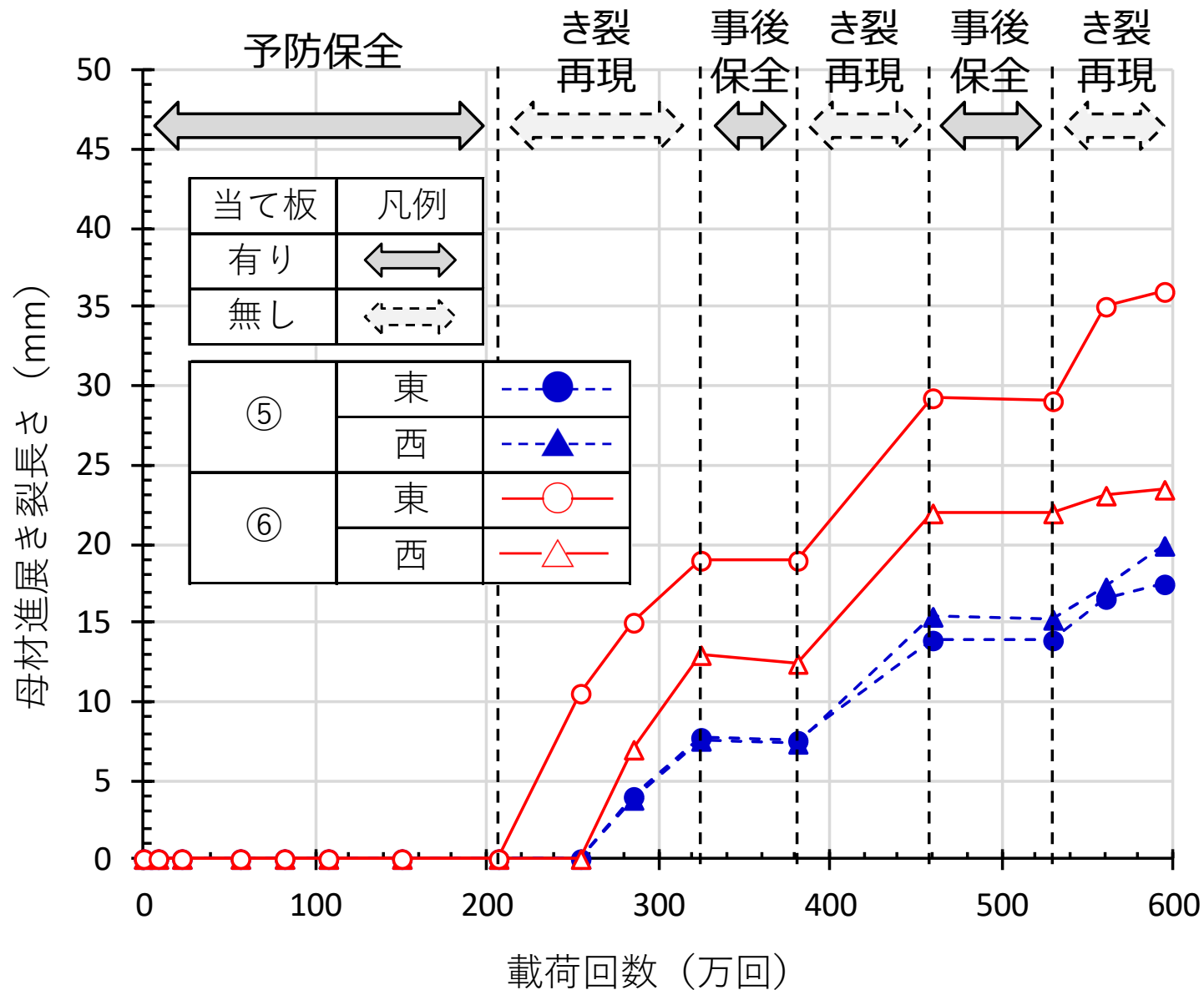
疲労試験ステップ

ステップ	従来構造		新設・更新用構造	
	目的	対策	目的	対策
1	予防保全効果 の検証	当て板	予防保全効果 の検証	改良構造
2	き裂再現	なし		
3	事後保全効果 の検証	当て板		

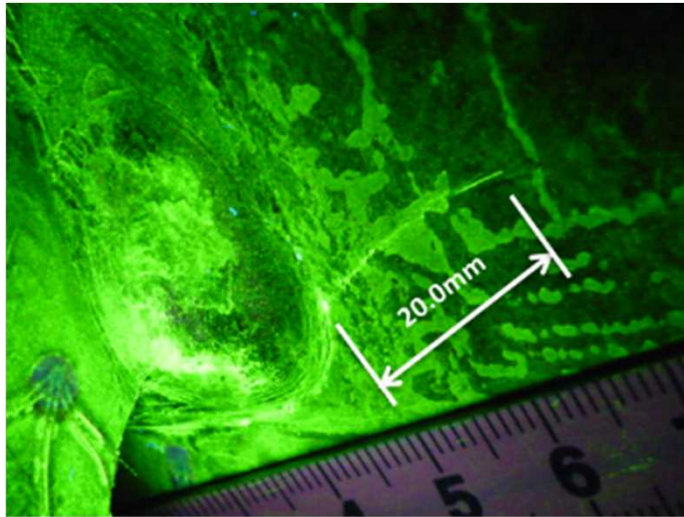
主応力図（載荷C）



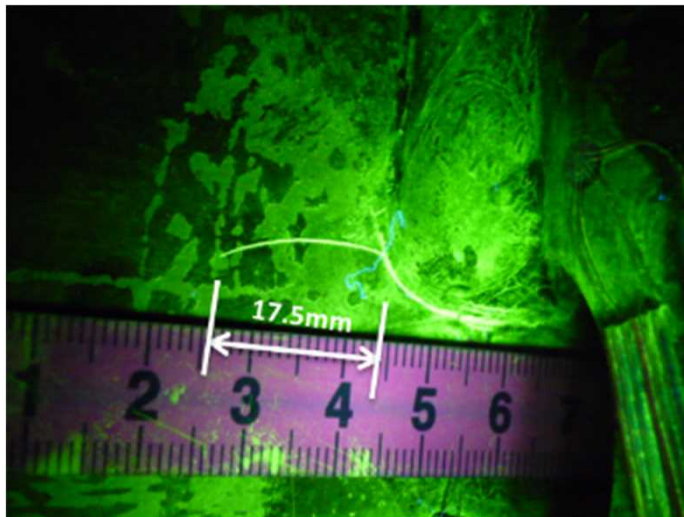
ひりブに生じたき裂長さと载荷回数との関係



き裂進展状況 (594万回)

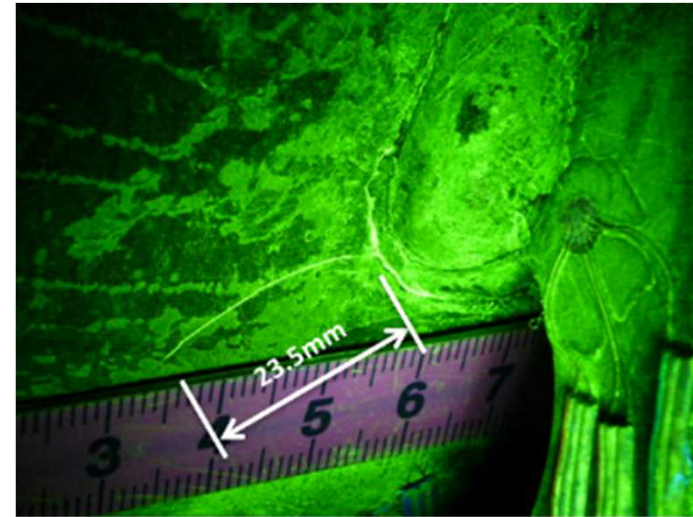


⑤ 西 (20.0mm)



⑤ 東 (17.5mm)

再々当て板外し後 64万回载荷

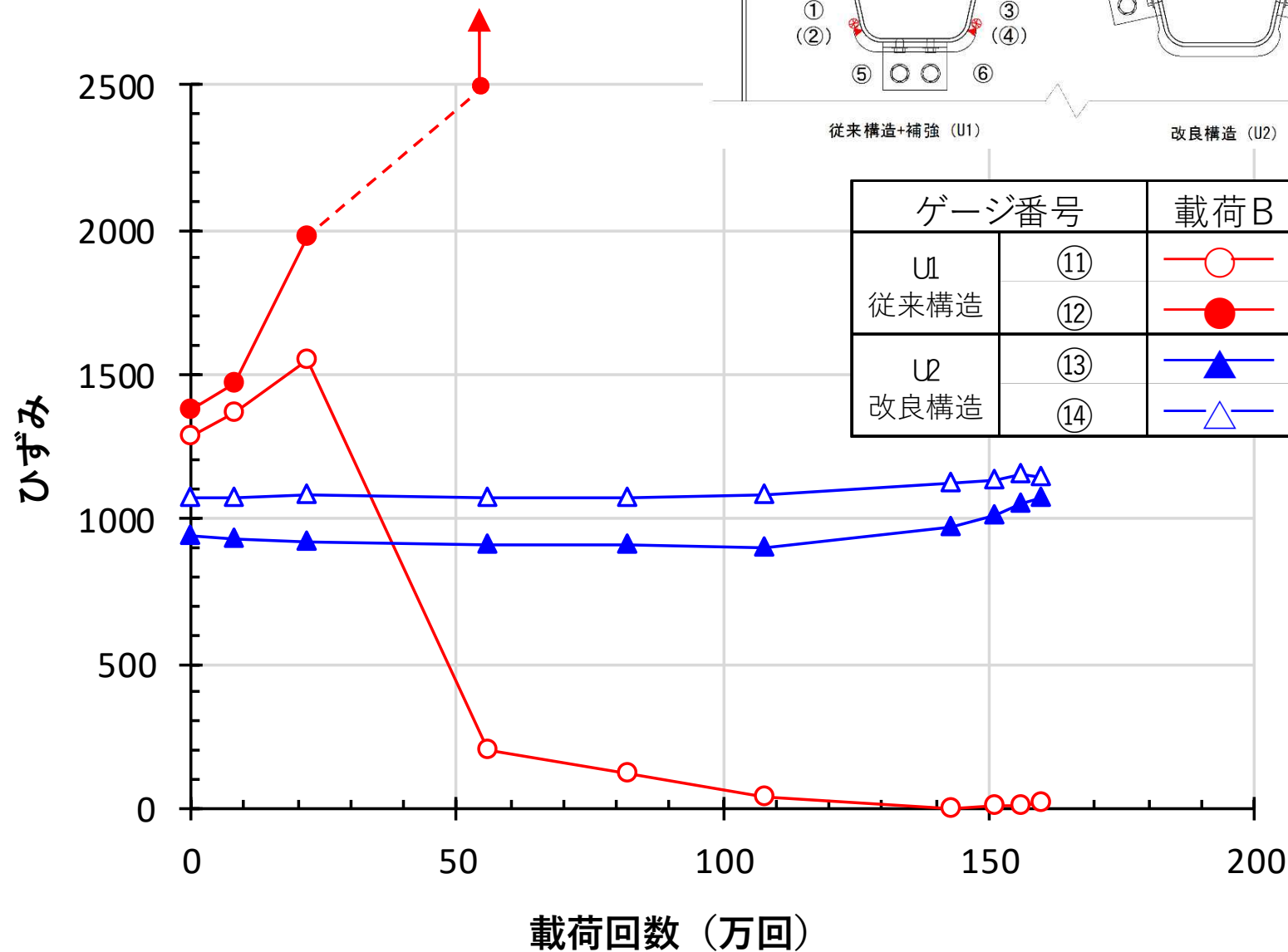


⑥ 西 (23.5mm)

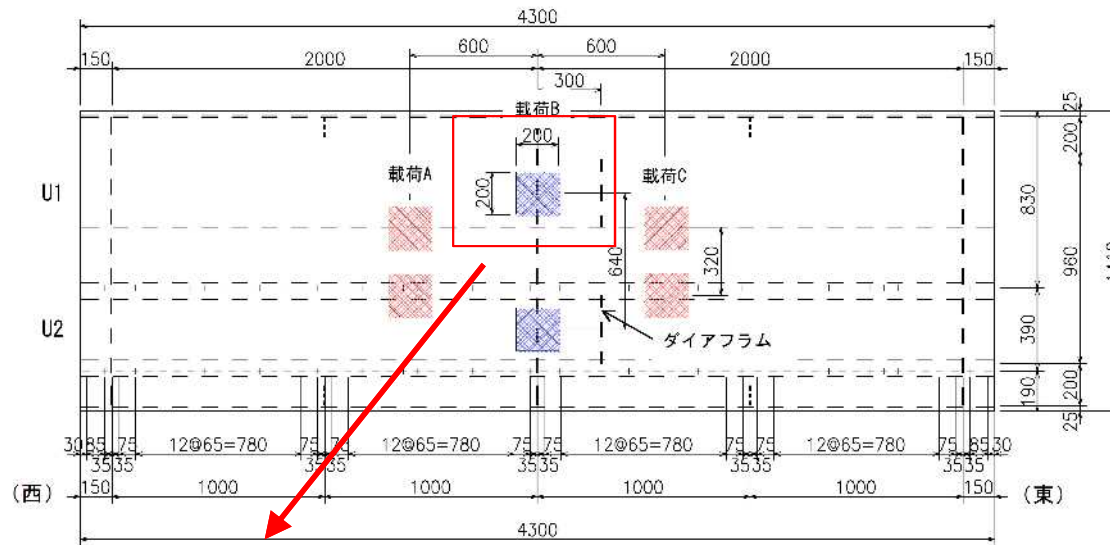


⑥ 東 (36.0mm)

デッキ上面のひずみ変化



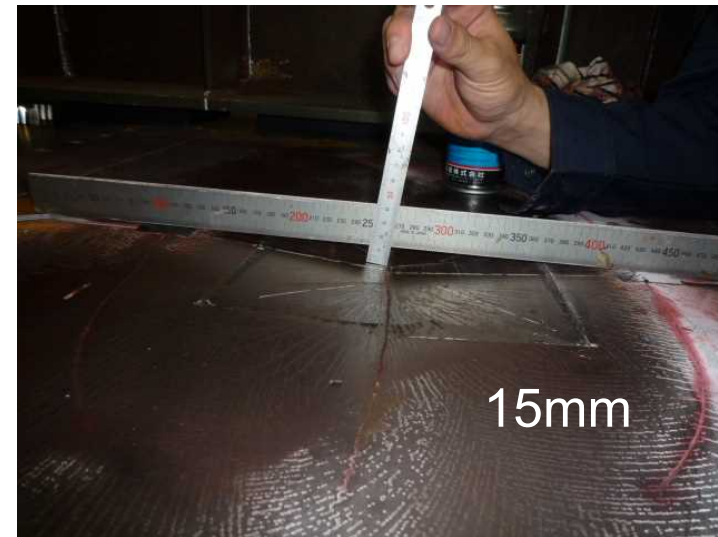
デッキ上面のき裂発生状況 (160万回)



平面図



U1デッキ上面



U1デッキ上面陥没深さ

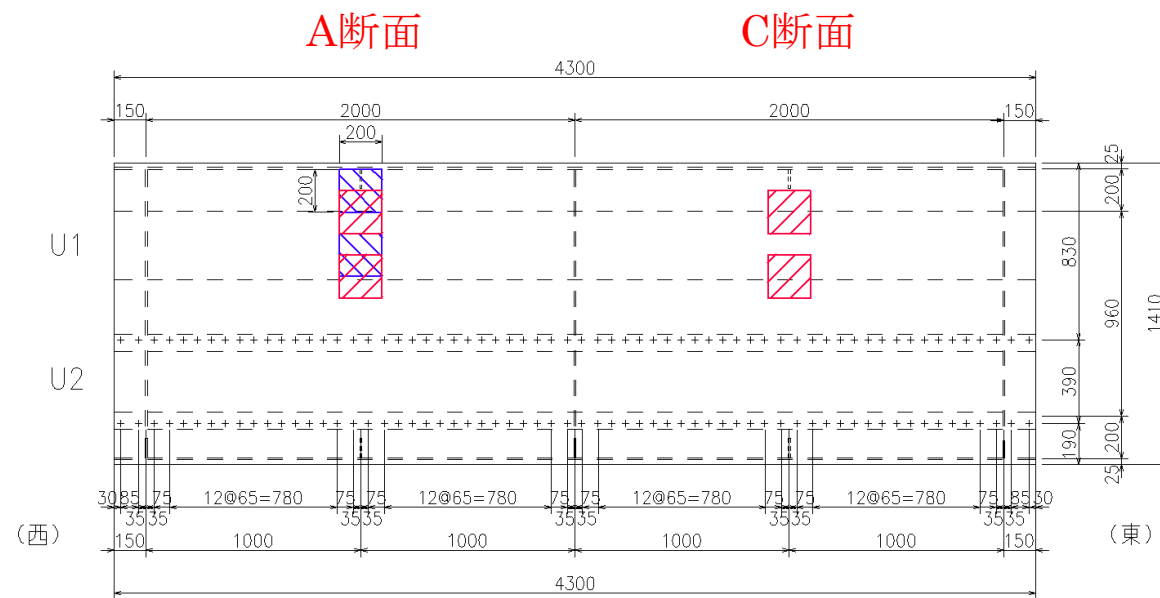
まとめ

1. 従来構造に当て板補強を施すことにより、横リブスリット部のき裂に対しては、十分な予防保全効果とき裂進展防止効果があることが確認された。
ただし、デッキ貫通亀裂に対しては効果がなかった。

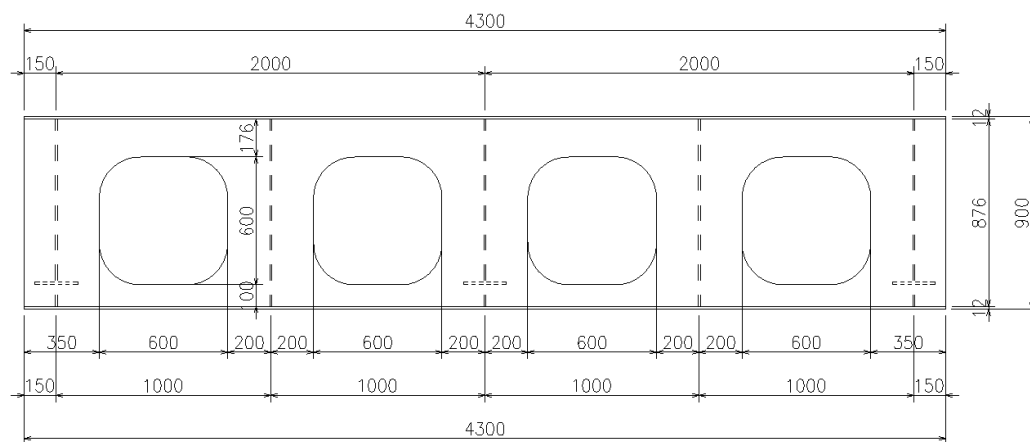
⇒デッキ亀裂に対しては、TRSを用いた下面補強により対応可能！

2. 改良構造では、Uリブと横リブ交差部、デッキともに疲労き裂は全く発生せず、十分な疲労耐久性が確認された。

②-2 垂直補剛材上端部 (既設の補強)



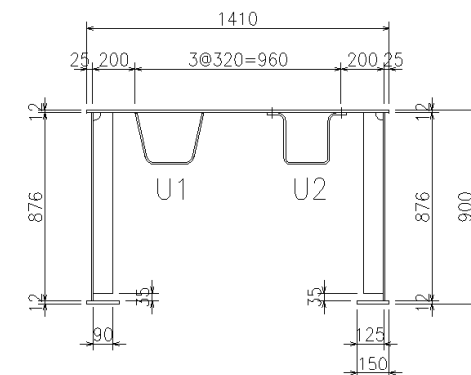
(1) 平面図



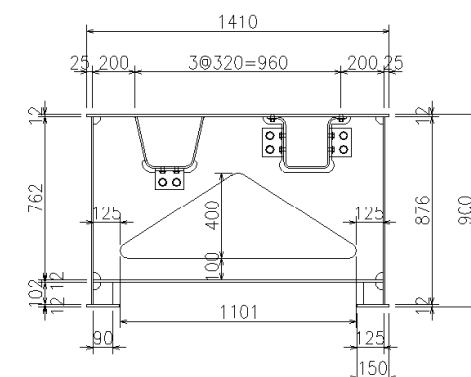
(2) 側面図



 載荷位置 (単位: mm)



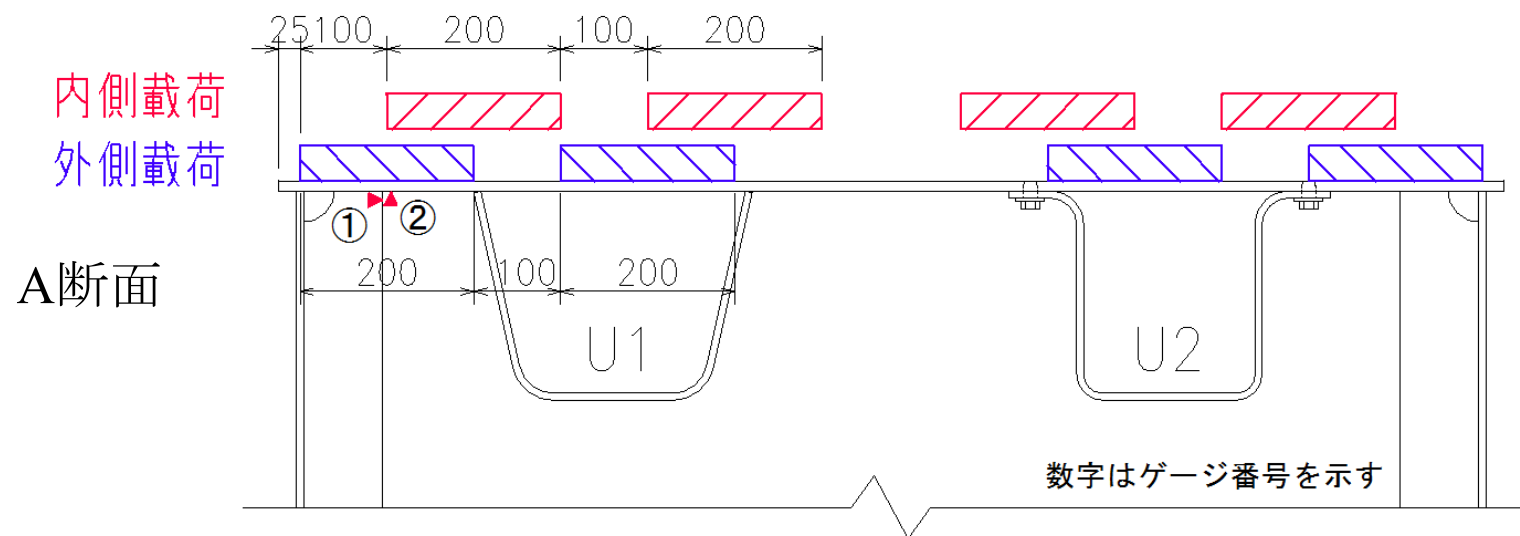
(3) 断面図 (支間部)



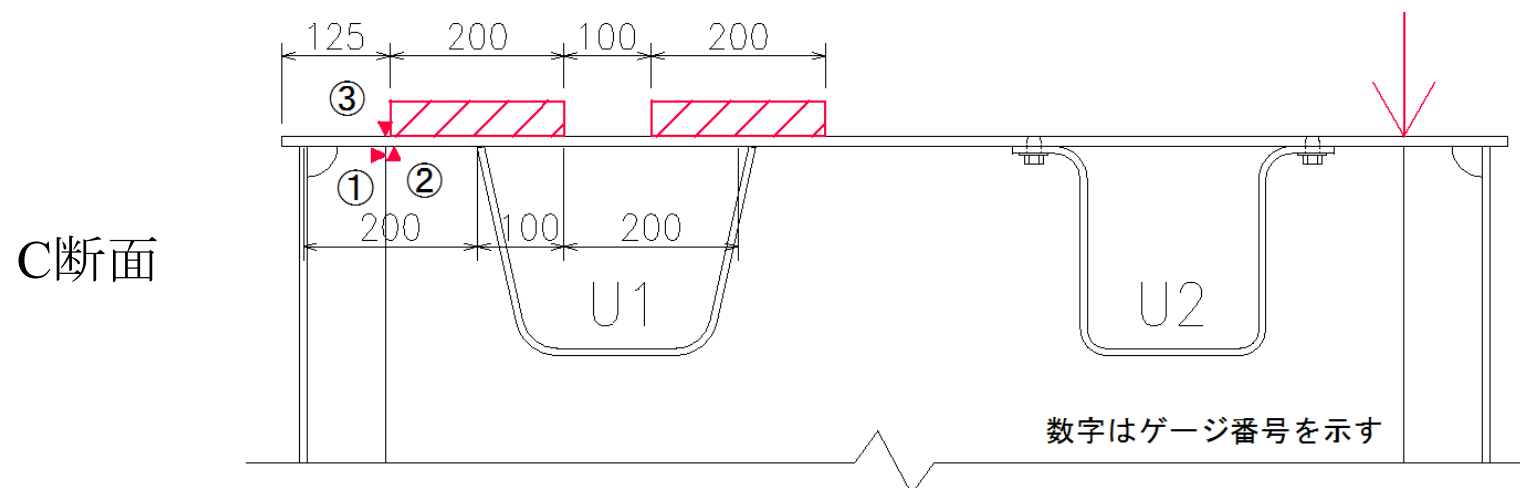
(4) 断面図 (横リブ交差部)

※端横桁のみ切欠き

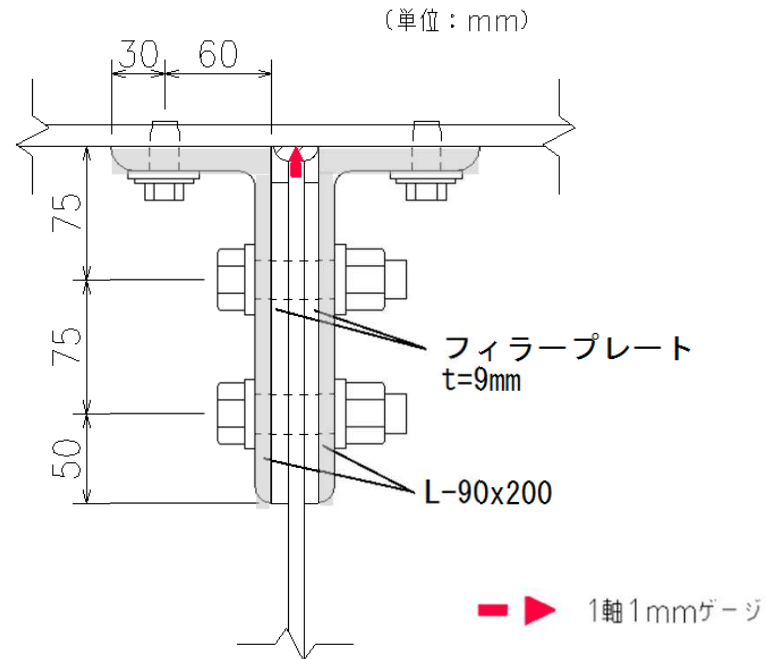
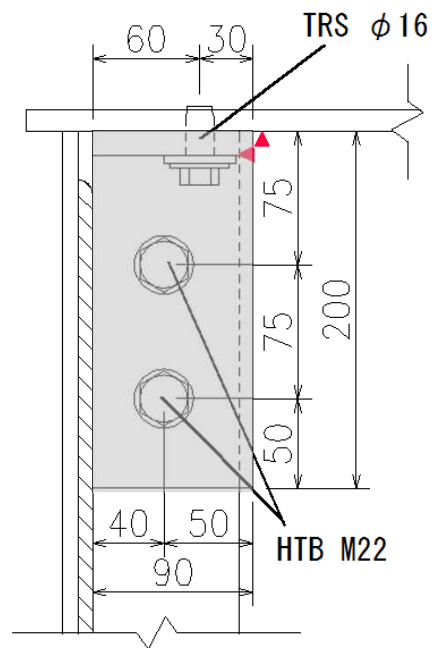
載荷位置



A断面では2通りの載荷位置で静的載荷試験を実施
より大きな断面力の生じる載荷位置で疲労試験を行う



当て板形状詳細



補強方法は**RC床版橋**
【姫路大橋】で採用されたものを準用した。

疲労試験ステップ

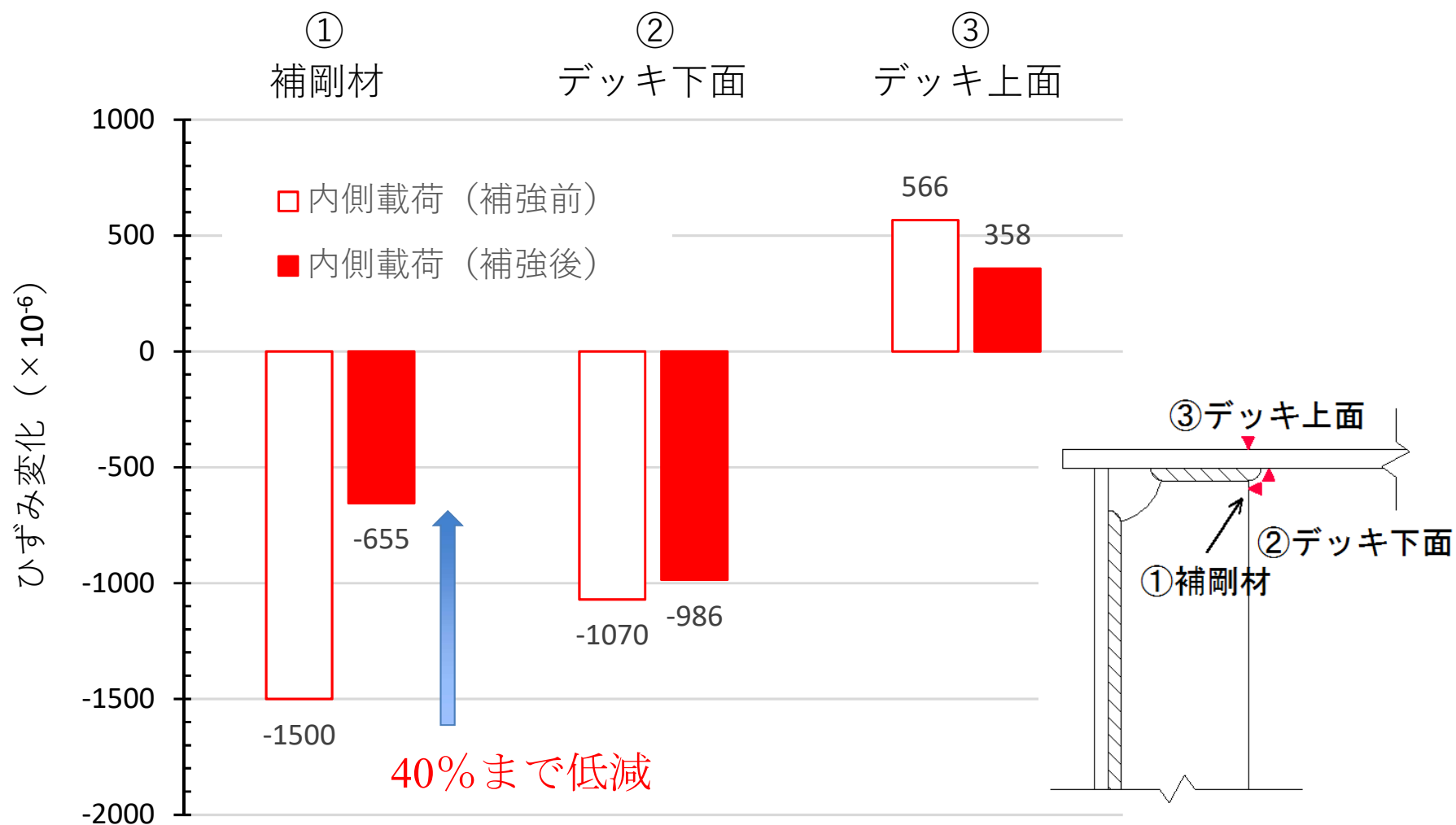
<A断面>

ステップ	目的	対策
1	き裂再現	—
2	事後保全対策効果の検証	き裂削除＋当て板補強

<C断面>

ステップ	目的	対策
1	予防保全対策効果の検証	当て板補強
2	き裂再現	なし
3	事後保全対策効果の検証	き裂削除＋当て板補強
		き裂削除のみ
		き裂削除＋当て板補強

静的載荷試験結果（C断面）

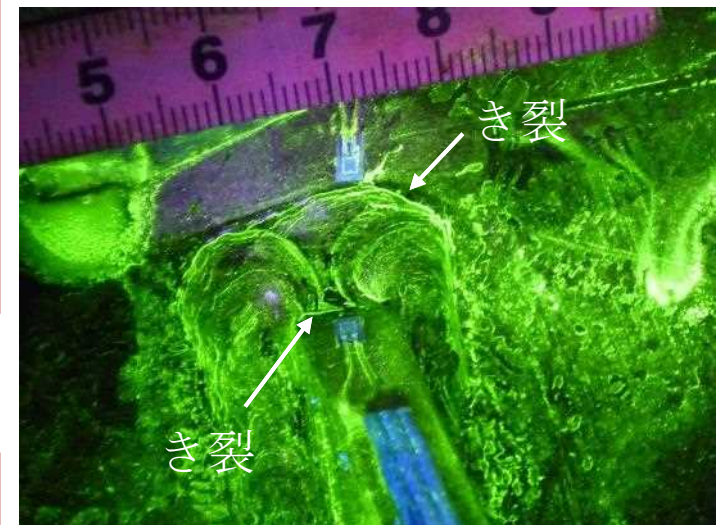
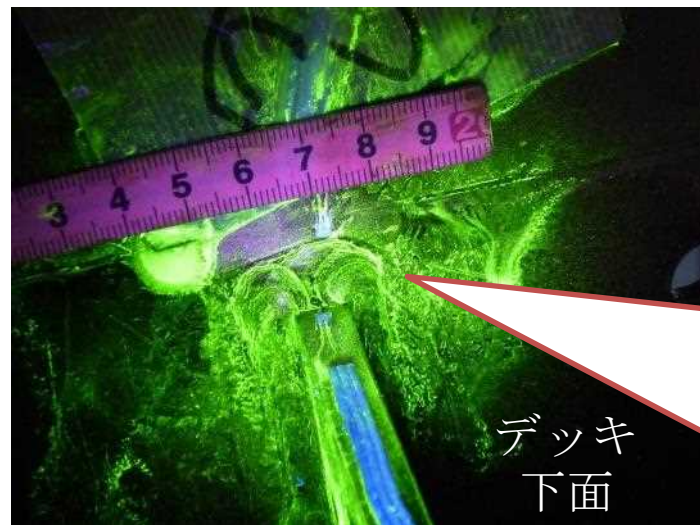


補強を施すことで、補剛材コバ面の応力が40%程度まで低減

き裂再現（き裂発生状況）

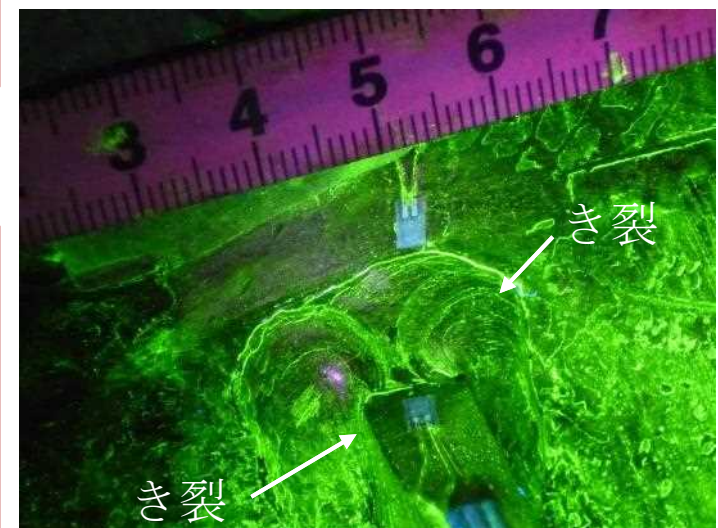
N=460万回

き裂再現
(134万回)



N=482万回

き裂再現
(156万回)



当て板を外して130万回程度载荷した結果、デッキ及び補剛材からき裂発生

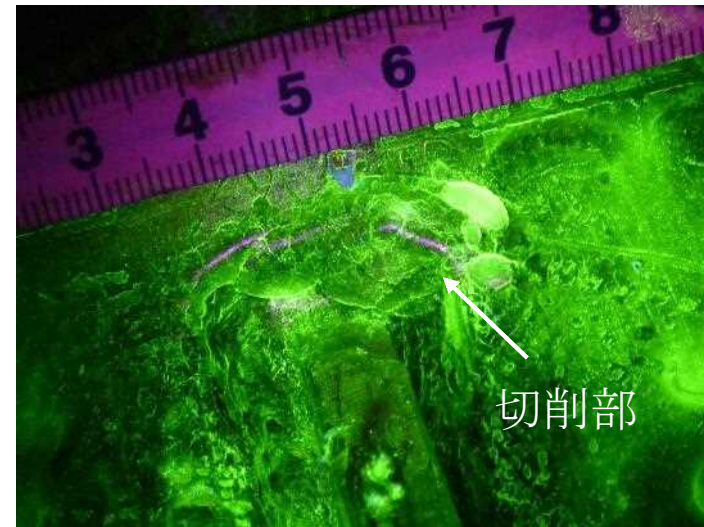
き裂再現→事後保全対策2（切削後） $N=482$ 万回

＜最終切削長さ＞

- ・長さ：35mm
- ・幅：15mm
- ・深さ：3mm



切削風景



切削部拡大MT



切削後当て板取り付け



切削部拡大

事後保全対策2→3（当て板取り外し前後） $N=790$ 万回



当て板取り外し前



当て板取り外し前MT



当て板取り外し後

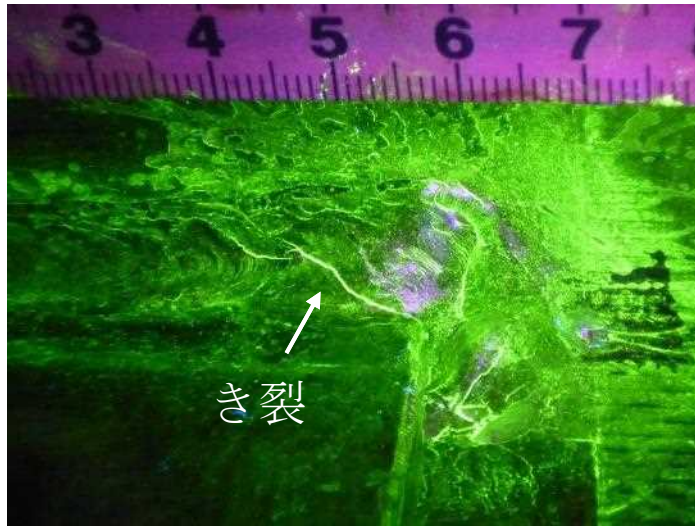


当て板取り外し後MT

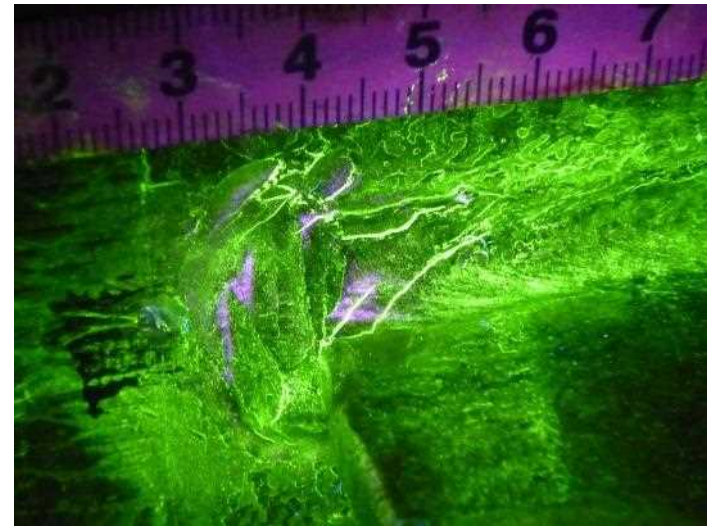
き裂削除+当て板を施し300万回载荷した結果、き裂は再発しなかった。
そのため、当て板を外して疲労試験を続行した。

事後保全3（き裂再発生）

$N=984$ (194) 万回時



U1西面



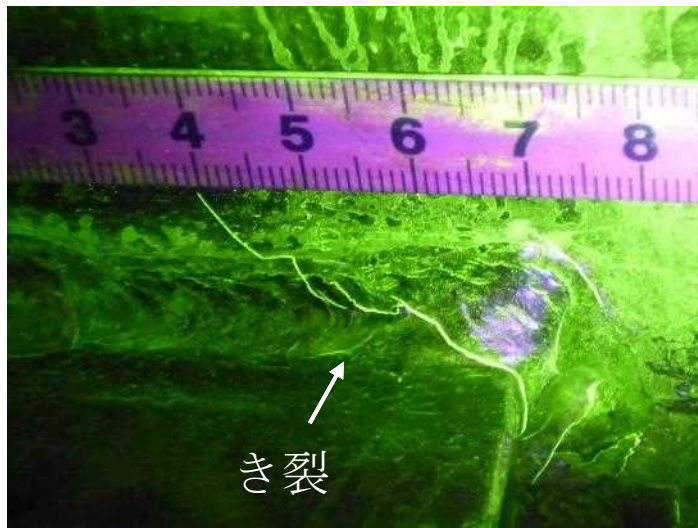
U1東面



U1上端部

当て板を外して疲労試験を行った結果、130万回程度载荷した時点でひずみが増大し始め、き裂の再発が確認された。

事後保全対策3→4 (切削後) $N=1244$ 万回



U1西面



U1東面



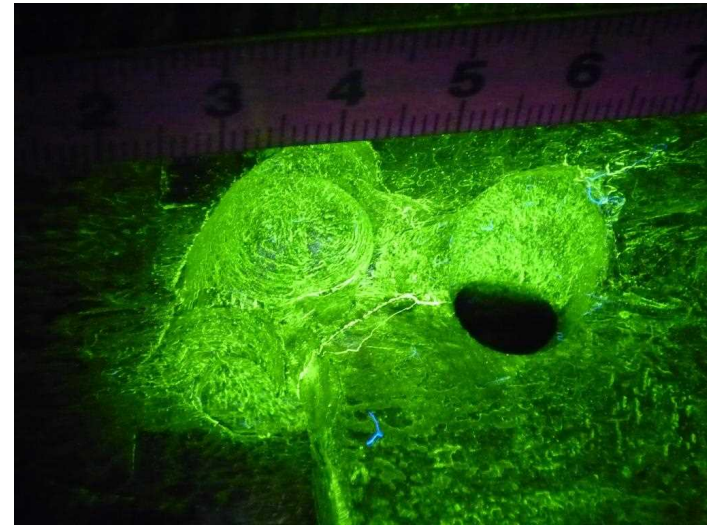
U1上端部



事後保全対策4（疲労試験終了） $N=1560(316)$ 万回



U1西面



U1東面



U1上端部



U1上端部

300万回以上载荷してもき裂の再発は確認されなかった。

まとめ (1)

<静的載荷試験結果>

- TRSを用いて下面から当て板補強を施すことにより、垂直補剛材コバ面に生じる応力を30～40%に低減できることが確認された。

<疲労試験結果>

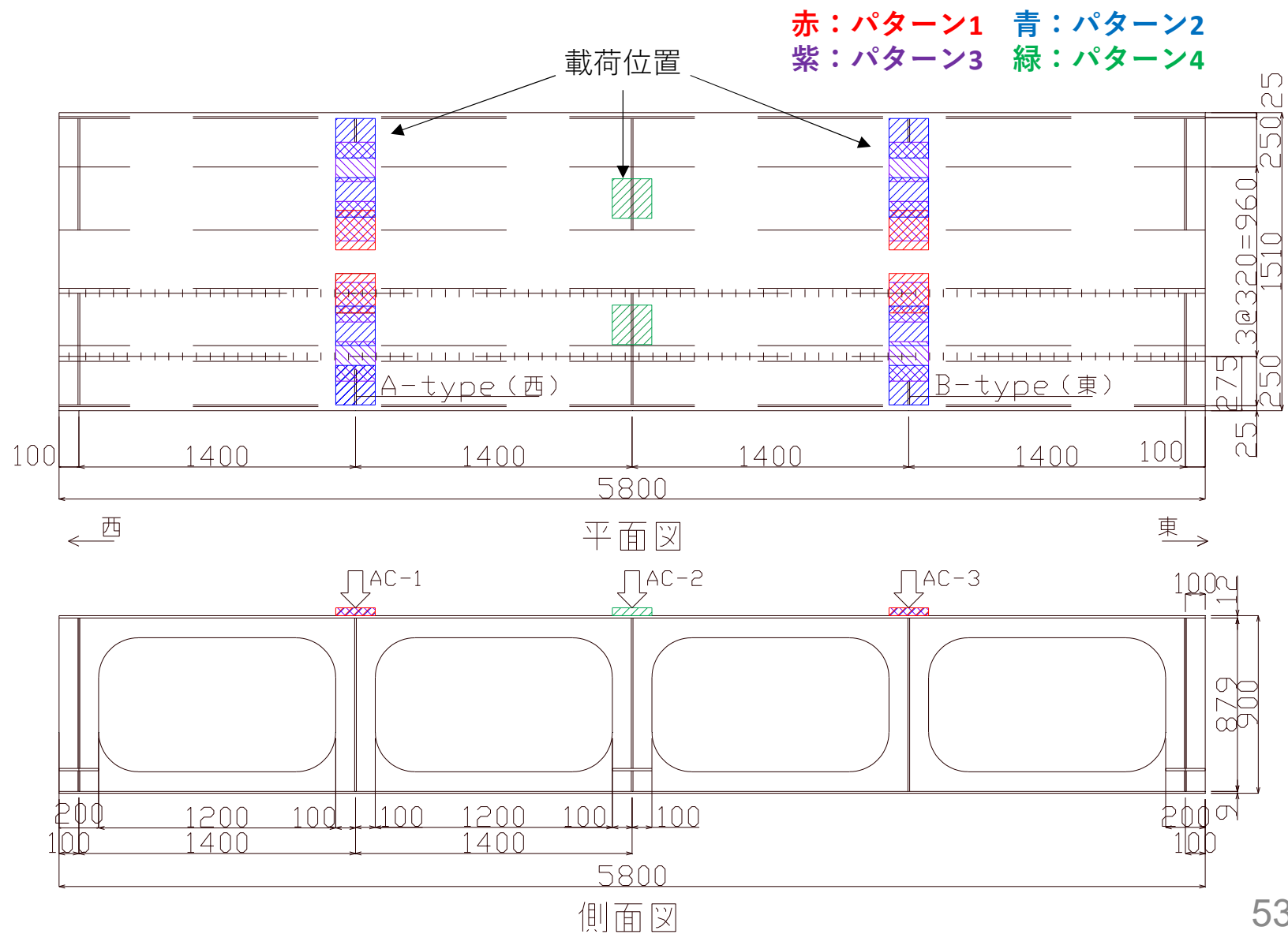
- TRSを用いた当て板補強を施さない場合、130～160万回程度の繰り返し載荷で垂直補剛材上端部の溶接止端部から疲労き裂が発生したが、補強を施した場合には330万回載荷してもき裂が発生しなかったことから、予防保全効果が検証された。

まとめ (2)

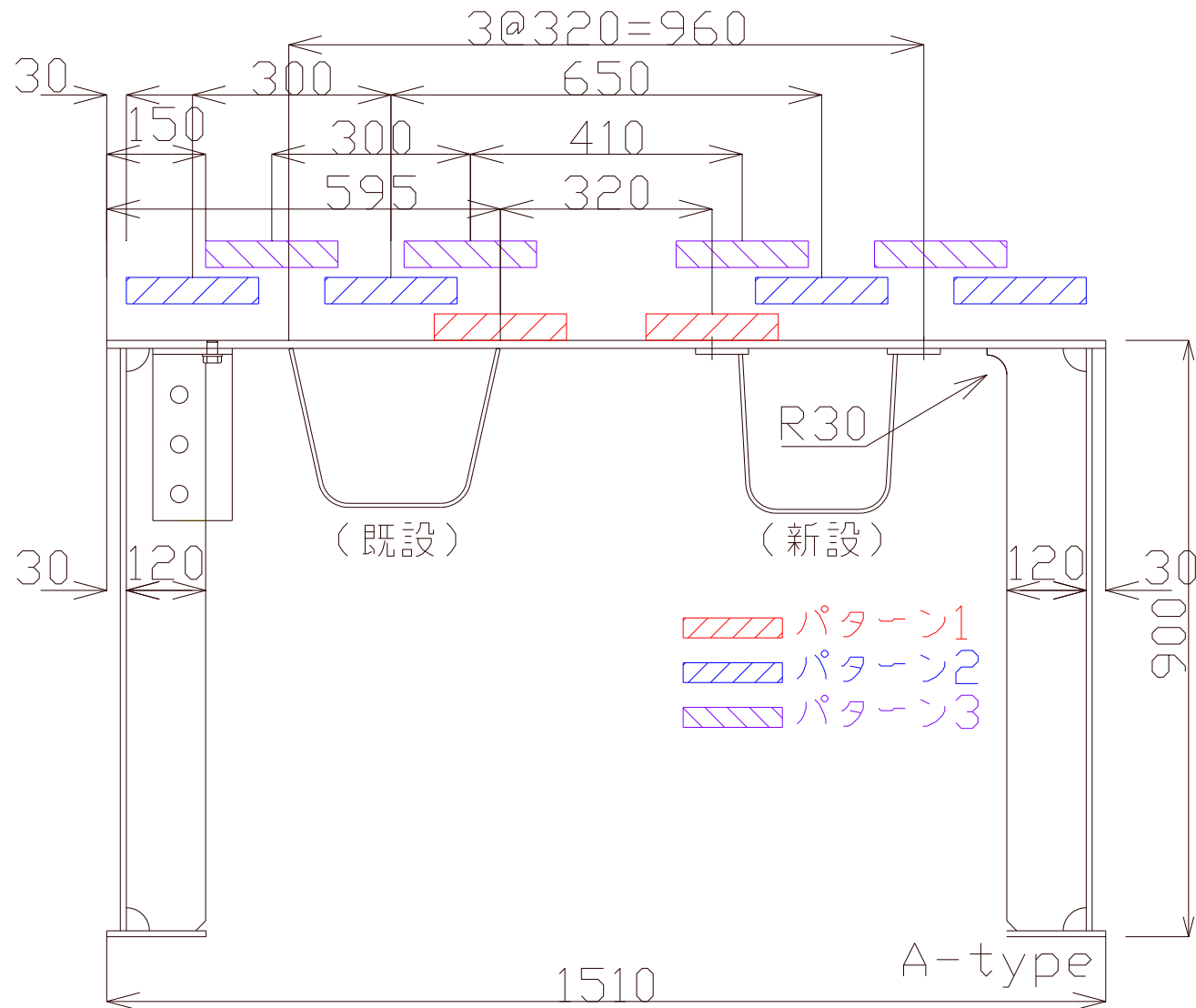
- デッキ側の止端部から発生し、デッキ母材から38mm程度進展したき裂に対しては、**削り込みによる削除部を覆うような大きさのアングル材が必要**である。
- デッキ側の溶接止端から発生し、止端部にとどまっている比較的短いき裂、および補剛材の溶接止端から発生し、ビードを横切ってデッキに進展したき裂に対しては、**削り込みによるき裂の削除と、補剛材幅程度のアングル材により、き裂の再発を防止できることが検証された。**
- 予防保全と事後保全対策の疲労試験終了後にTRSとTRS孔を確認したが、**TRS、TRS孔ともに特に変状は認められなかった。**

②-3 垂直補剛材上端部
(新設・更新用)

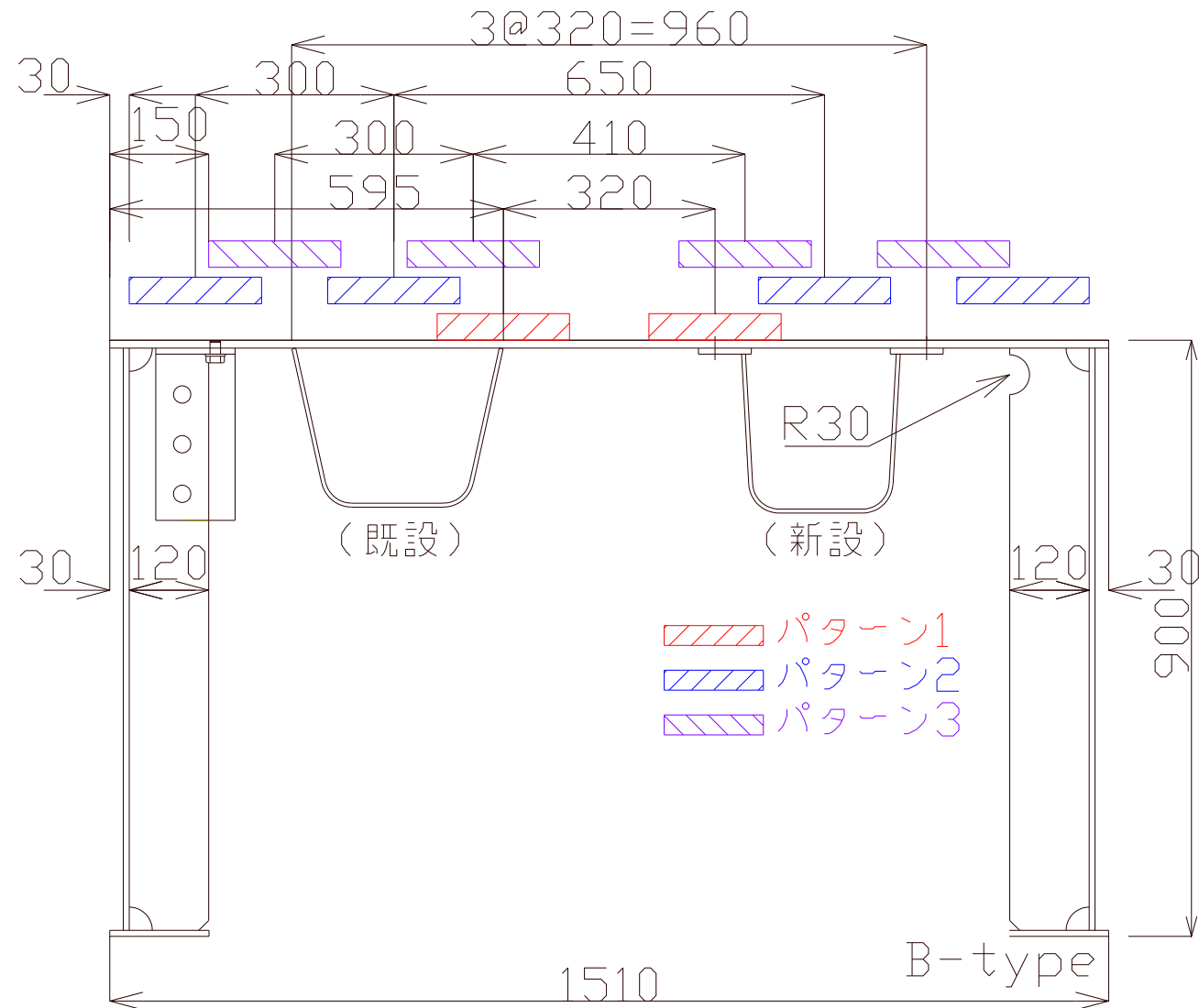
試験体（１）全体図と載荷位置



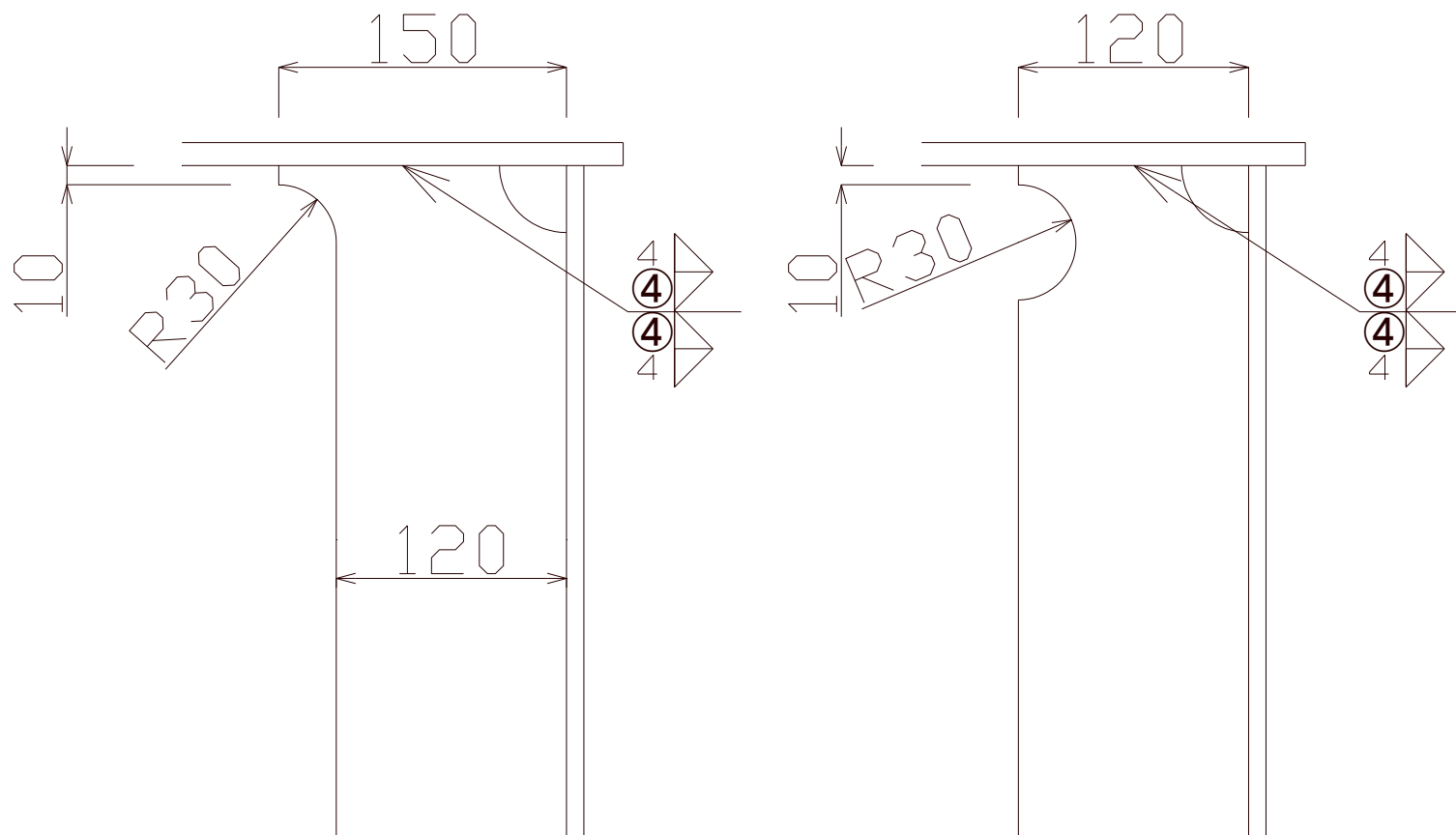
試験体（３）西側補剛材断面図と載荷位置



試験体（４）東側補剛材断面図と載荷位置



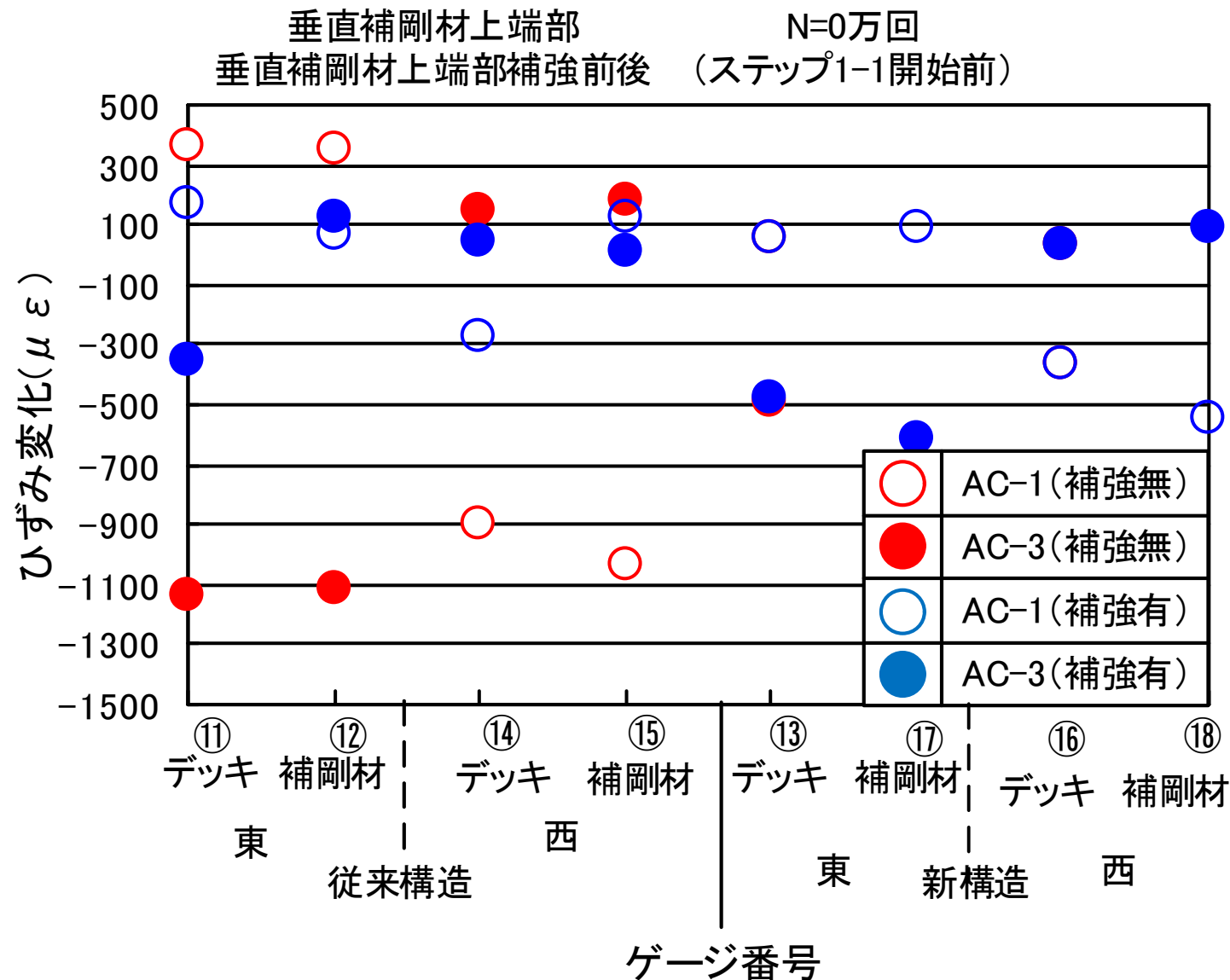
新設構造側詳細



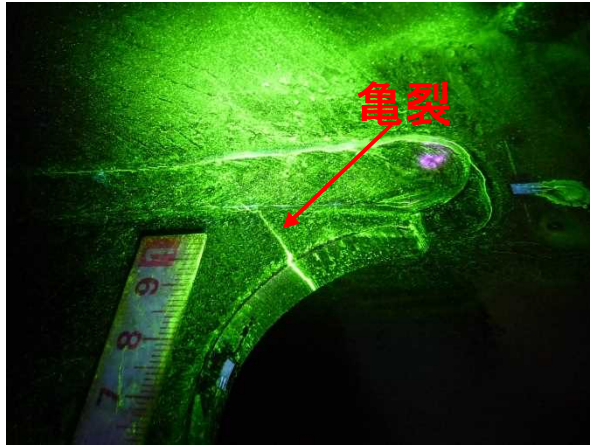
(1) フィレットタイプ

(2) 半円切り欠きタイプ

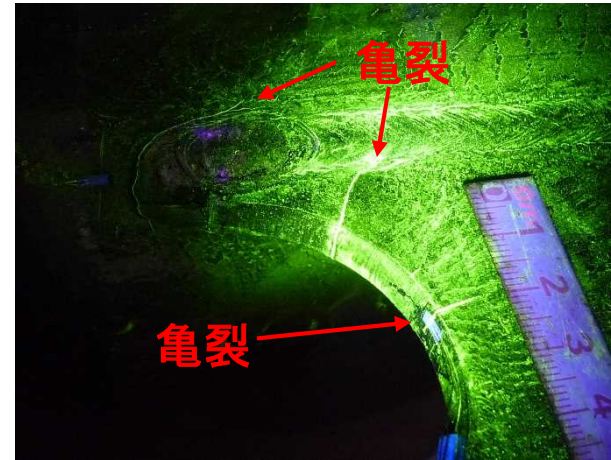
N=0万回（疲労試験開始前） 補剛材上端部 補剛材上端部補強前後



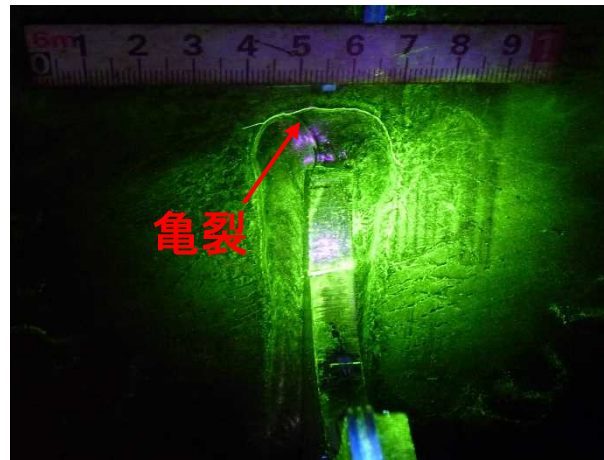
発見時の半円切り欠き部のき裂



(1:母材部上 N=26万回)

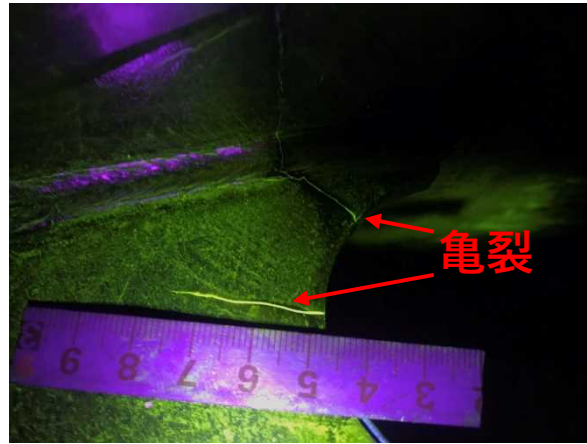


(2:母材部下 N=44万回)

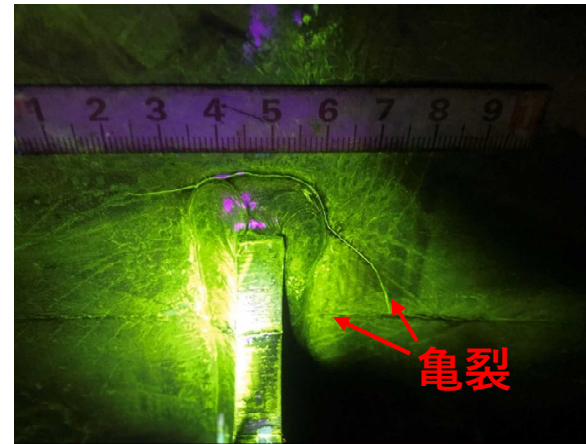


(3:溶接止端部 N=44万回)

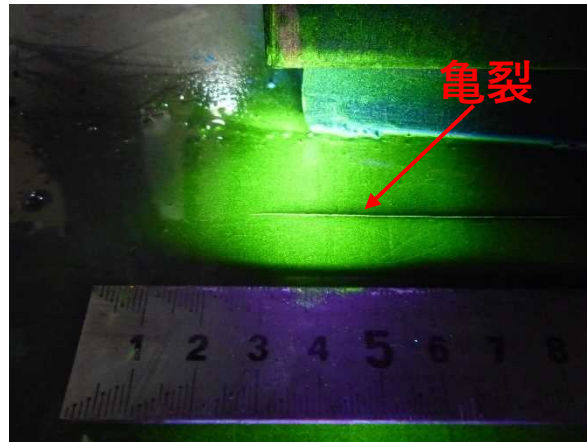
半円切り欠き部のき裂進展状況（203万回）



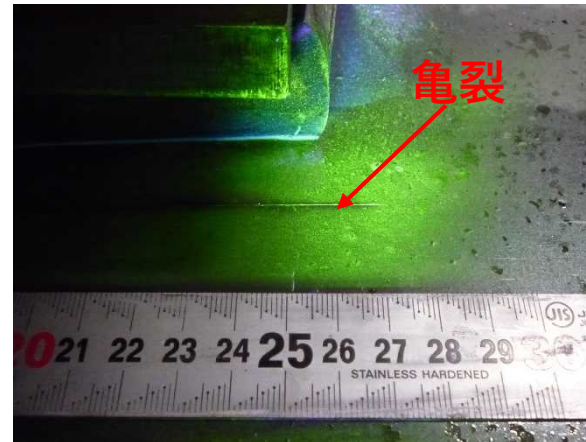
(1:母材部)



(2:デッキ下面)



(3:デッキ上面西側)



(4:デッキ上面東側)

ステップ2（着目箇所：補剛材上端部）

(1)静的載荷試験より

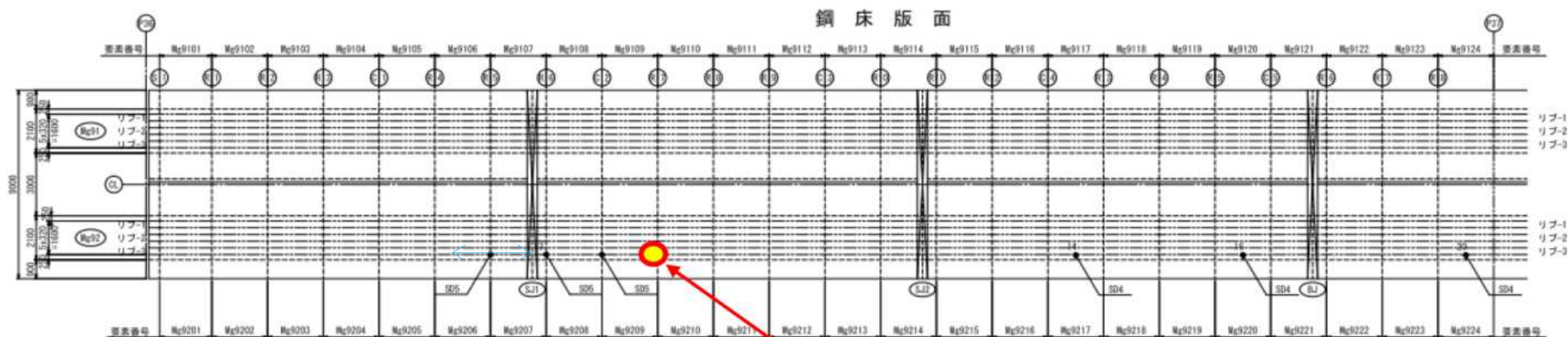
- ・外側載荷と内側載荷では、**内側載荷の方が高い応力**が計測されたため、内側載荷で試験を行った。
- ・フィレット構造では、デッキ側の溶接止端部の局部応力は**従来構造の1/3以下に大きく低下**した。

(2)疲労試験結果より

- ・フィレット構造では**300万回以上の繰り返し載荷を受けても疲労き裂は発生しなかった**。
- ・半円切り欠き構造では、**26万回で母材部からき裂が発生し、83万回でデッキにもき裂が発生しているのが確認された**。

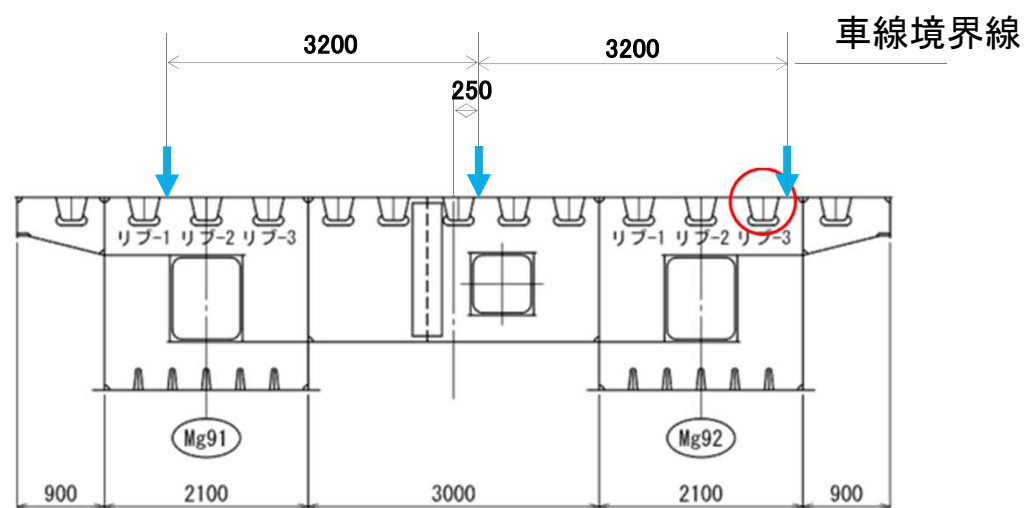
③ 実橋での検証

【Uリブ・横リブ交差部】



← 大阪方面

姫路方面 →



↓ : レーンマーク

浜手バイパス 測定位置

補強構造

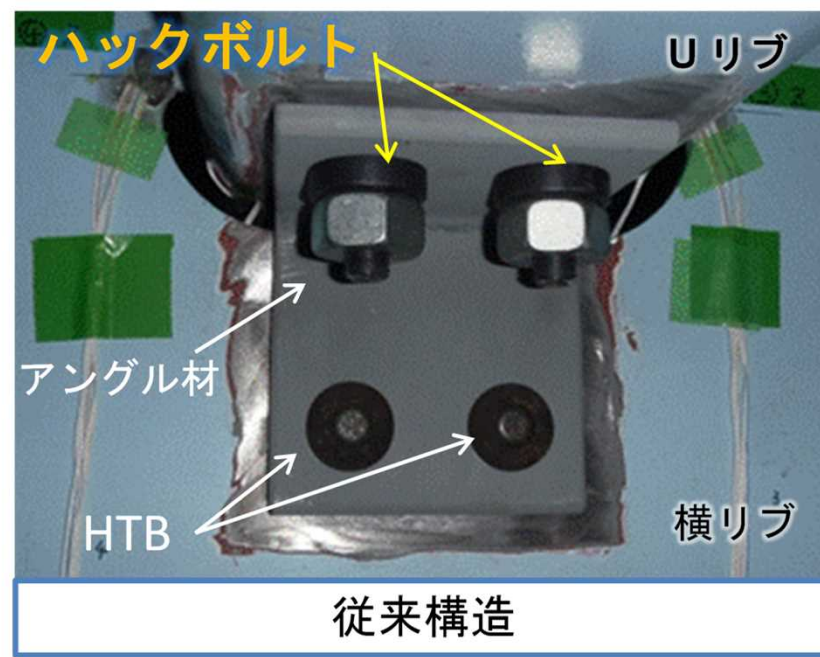


支圧接合型のワンサイドボルト TRS (Thread Rolling Screw)

従来構造：接続に摩擦接合型ワンサイドボルト（ハックボルト）を使用

新構造：Uリブの密閉性を確保するために

→ 支圧接合型のワンサイドボルト TRS を使用



Uリブ・横リブ交差部の補強構造

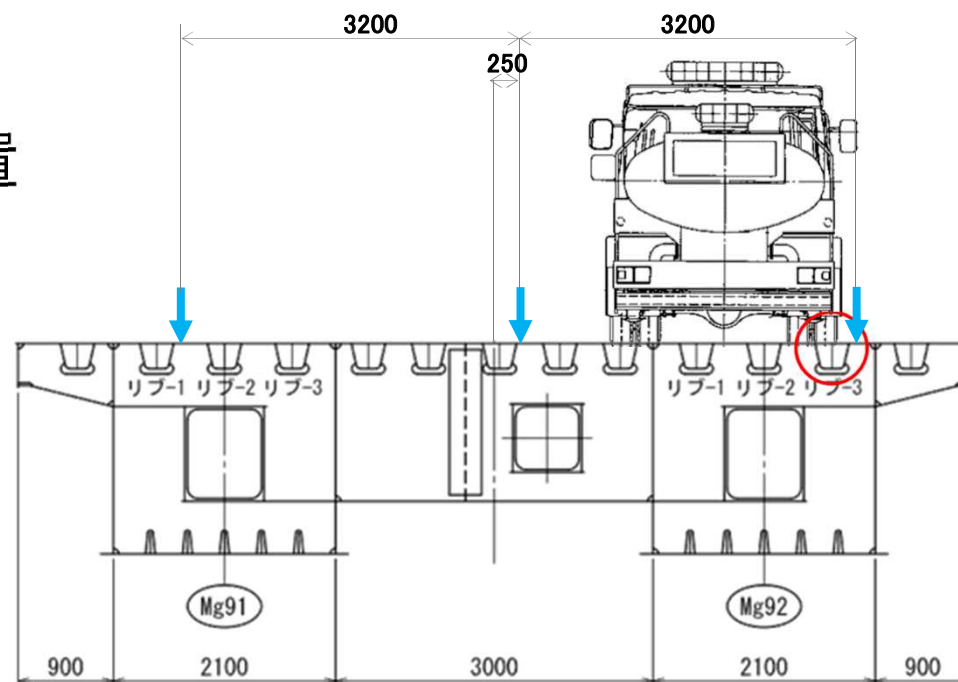
走行試験



走行試験(散水車) 試験車両諸元

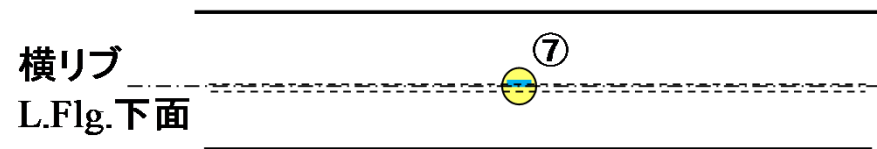
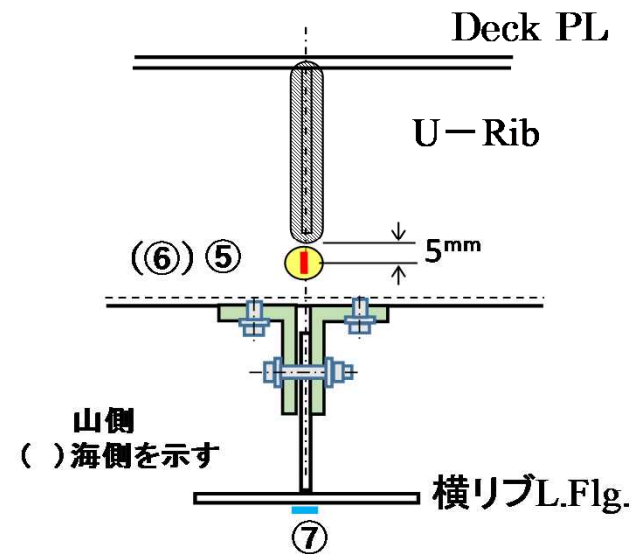
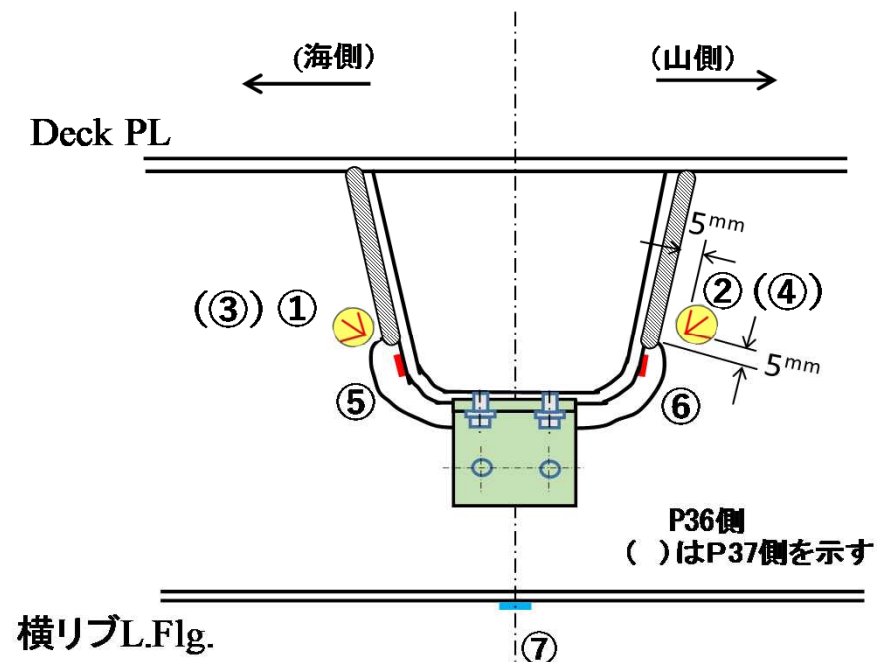
走行位置

載荷位置

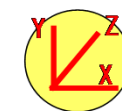


↓ : レーンマーク





	3 軸 (1mm) 4枚
	1 軸 (1mm) 2枚
	1 軸 (5mm) 1枚
合計	7枚

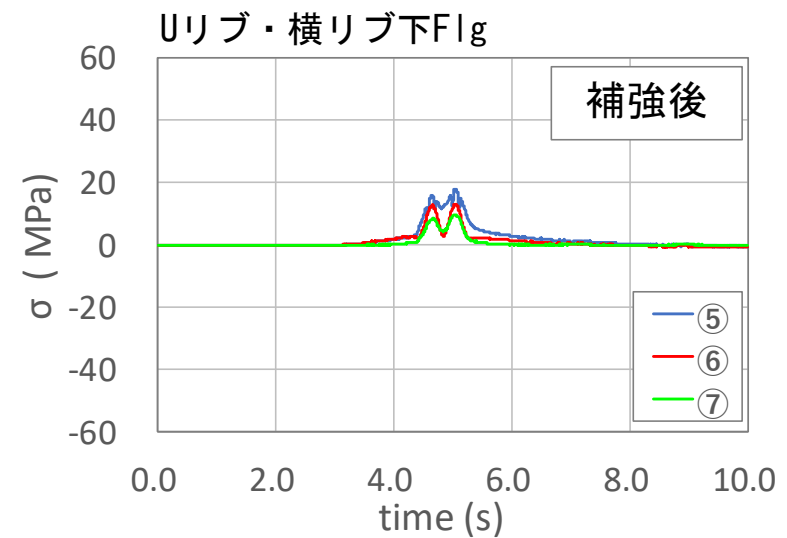
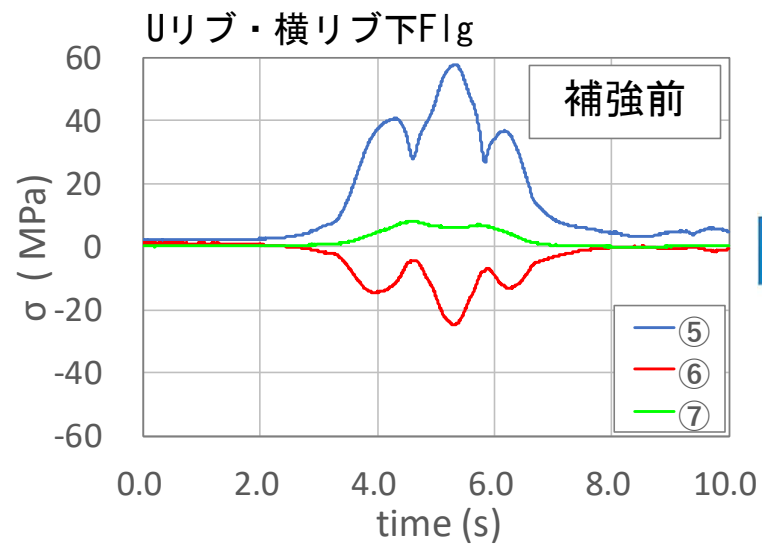
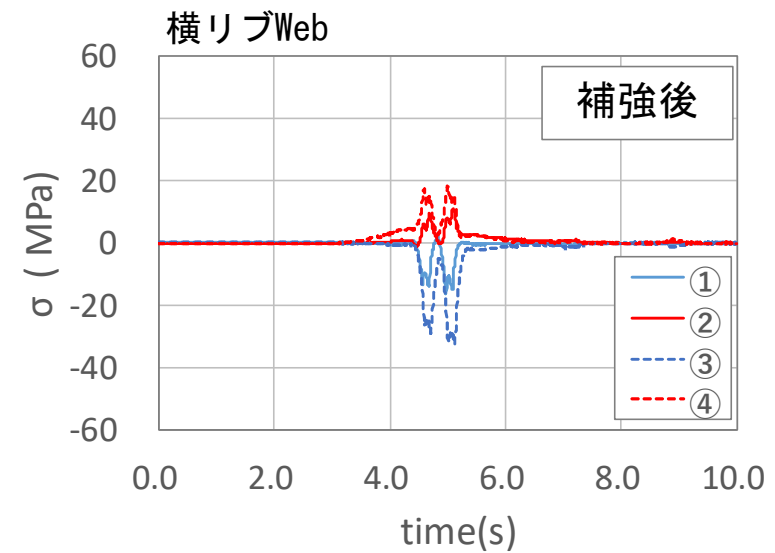
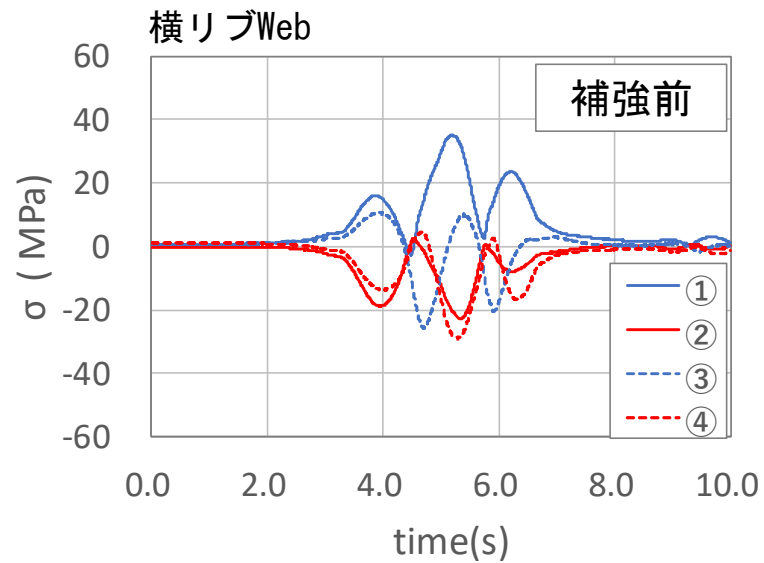


3 軸ゲージ各軸の方向
(※ 測定方向：溶接線に直角方向)

ゲージ位置

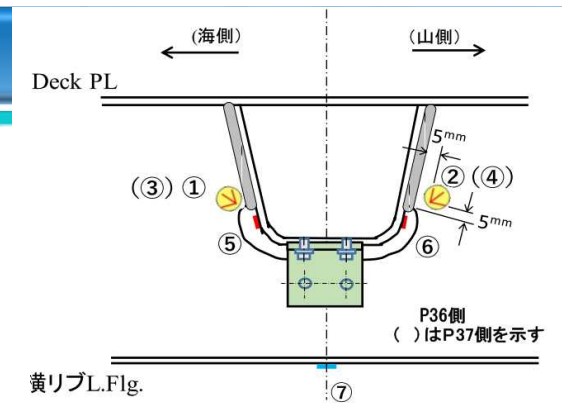
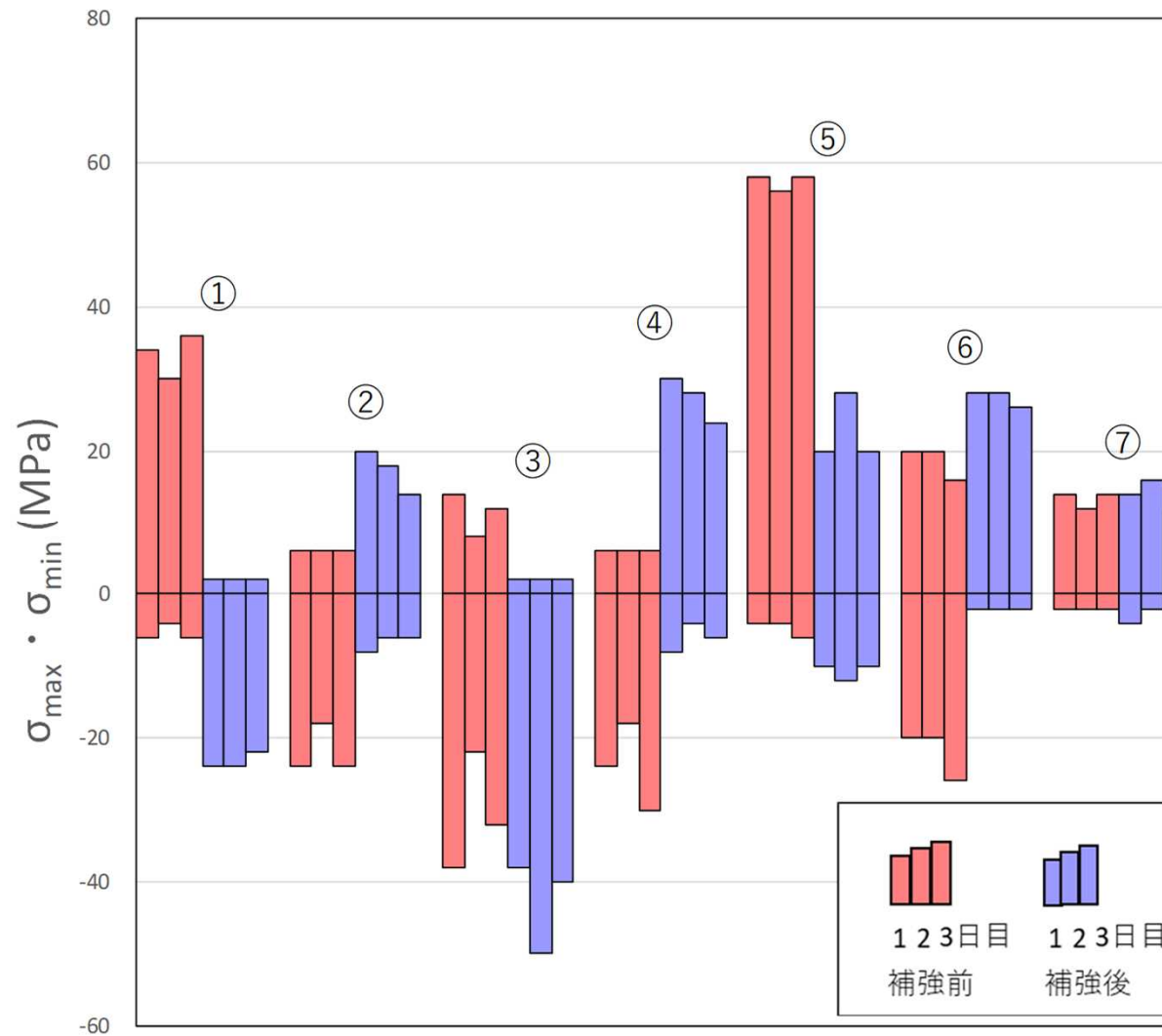
補強前

補強後

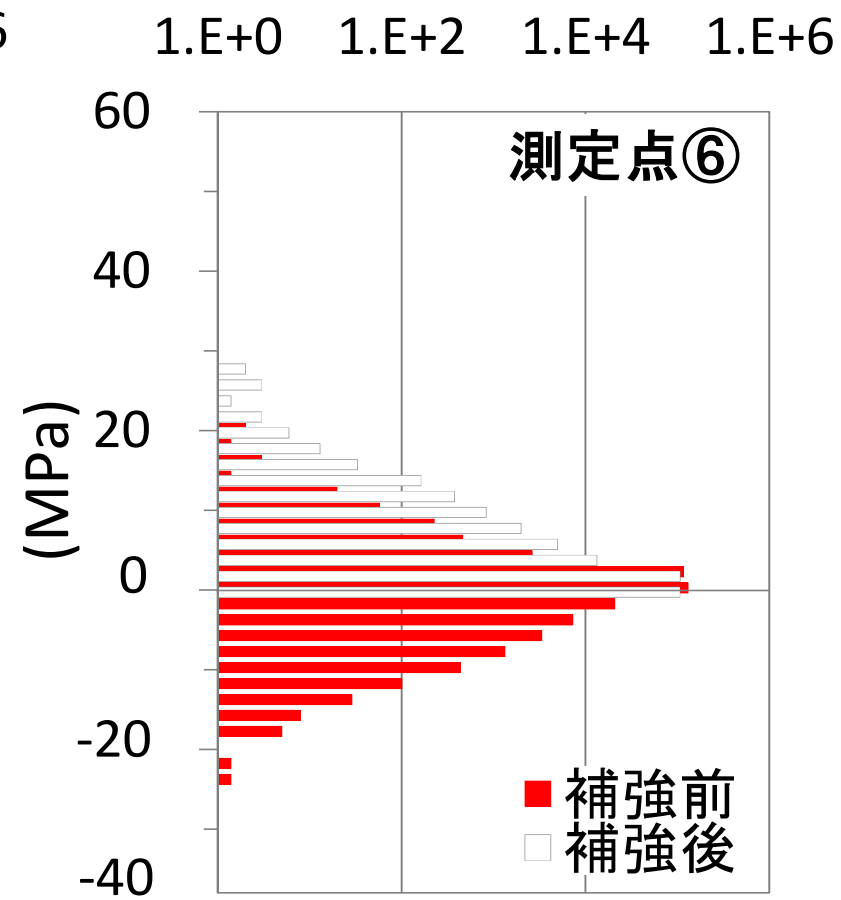
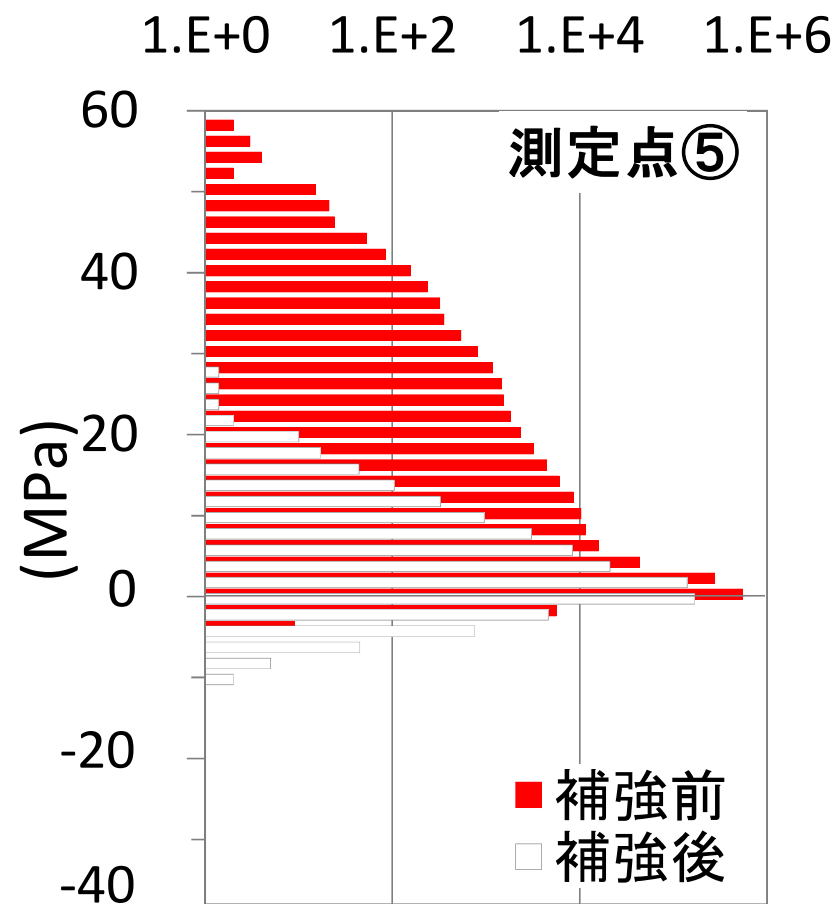


応力波形一例（測定点①での発生応力最大時）

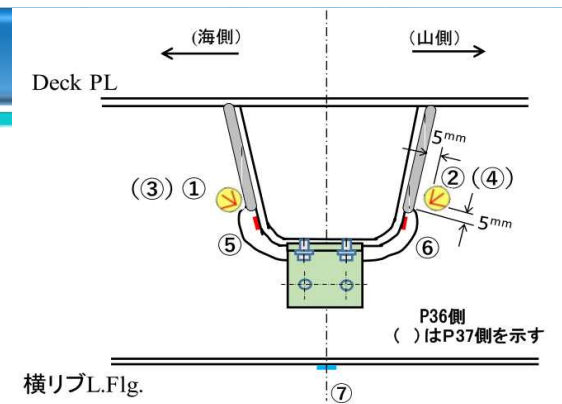
3.2 応力頻度測定結果



ピークバレー法による発生応力の最大・最小値



ピークバレー法による応力頻度分布(測定⑤,⑥)



補強前後の推定疲労寿命

	対象部材	測定点	強度等級	許容 応力範囲 (MPa)	応力打切 限界 (MPa)	最大 応力範囲 (MPa)	等価 応力範囲 (MPa)	有効繰返 回数 (cycles)	D累計 (/日)	寿命 (年)
補強前	横リブWeb	①	F	65	46	40	-	-	∞	∞
		②	F	65	46	30	-	-	∞	∞
		③	F	65	46	50	49	2	0	20000
		④	F	65	46	36	-	-	∞	∞
	Uリブ側面	⑤	G	50	32	64	39	608	0	55
		⑥	G	50	32	44	41	2	0	15000
	横リブ下Flg	⑦	D	100	84	16	-	-	∞	∞
補強後	横リブWeb	①	F	65	46	26	-	-	∞	∞
		②	F	65	46	28	-	-	∞	∞
		③	F	65	46	52	51	1	0	34000
		④	F	65	46	38	-	-	∞	∞
	Uリブ側面	⑤	G	50	32	40	38	1	0	37000
		⑥	G	50	32	30	-	-	∞	∞
	横リブ下Flg	⑦	D	100	84	18	-	-	∞	∞

4. まとめ

4.1 発生応力について

- ・補強前は左右と、表裏で生じていた正負逆方向の応力が、補強後はそれぞれ同符号になり、全体的に減少した。鋼床版のUリブ横リブ交差部に対して補強を行うことによってUリブの橋軸および橋軸直角方向の水平の動きが抑制された。
- ・補強前の発生応力の最大値は、Uリブの左側⑤の58 MPaであったが、補強後は28 MPaと48%に半減した。
- ・横リブ下フランジでの発生応力の最大値(補強前14MPa, 補強後16MPa)は動的載荷試験の最大値(補強前4.7MPa, 補強後4.6MPa)の3.0倍(補強前)と3.5 倍(補強後)であった。試験車の後軸重が補強前は9.5t, 補強後は9.3tであったので、補強前に29t, 補強後に33t 程度の軸重が橋梁上を走行したと推定される。

4.2 応力範囲と疲労寿命について

- ・応力範囲の最大値は、Uリブの左側⑤が補強前で60MPaを超えていたが、補強後は40MPa 以下となり、約40%減少した。
- ・補強前に疲労寿命の最も短いものはUリブ左側の測定点⑤の55 年(G 等級)であったが、補強後は3万年以上となり、大幅に改善された。それ以外の部位についても、疲労耐久性が大幅に向上したことが検証された。

最後に

解析と実験で疲労耐久性を検証した補強工法と新しい構造について、

既設橋に対しては補強前後の実働応力計測により、有効性を検証済み！

新設橋や更新用の鋼床版に対しては設置後の実働応力計測により、

それらの有効性を検証したい。

→新設・更新用についてはフィールド募集中！

鋼床版耐久性向上プロジェクト 個別報告会のご案内

日時：平成2年11月13日(金)14:00～17:00

開催形式：ZoomによるWeb開催

定員：300名

申込み方法：後日新都市研究会HPに掲載します
(定員になり次第締め切らせていただきます)