

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、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

既設橋の縦リブと横桁・横リブの交差部に対しては、
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、
密閉性も確保できる

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、
リベット接手と同様な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。

平成29年度の研究

- ① 実橋での応力計測による疲労損傷状況の把握
- ② FEM解析による実橋の応力状態の再現
- ③ 疲労実験による横リブと縦リブの交差部に生じる疲労亀裂の再現

①実橋での応力計測

まとめ

- ① 実橋において補強前の鋼床版のUリブ・横リブ交差部の応力状態を把握することができた.
- ② 今後、補強工事が実施された後、今回と同じ計測位置で応力測定を行って補強前後の応力を比較し、疲労対策効果の検証を行う予定である.

② FEM 解析

実橋モデルのまとめ

- 実橋を模擬した有限要素解析を実施した結果、解析値は、応力の計測値を概ね再現することができた。

供試体モデルのまとめ

- 着目部位を踏むように、荷重が走行する場合は最も応力が大きくなる。
- Uリブ側の止端は、ダイヤフラムがある場合の方が、ダイヤフラムがない場合と比較し、応力が大きくなる傾向にあった。
- 横リブ側の止端は、ダイヤフラムがある場合の方が、ダイヤフラムがない場合と比較し、応力が小さくなる傾向にあった。
- Uリブ側の止端の方が、横リブ側の止端よりも応力範囲が大きくなった。

③疲労実験

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。**

平成30年度の研究進行状況

- ①実橋での補強工法の適用と
応力計測による補強効果の検証

- ②FEM解析による
既設橋に対する補強工法の検討

- ③疲労実験による
補強工法の疲労耐久性の検証

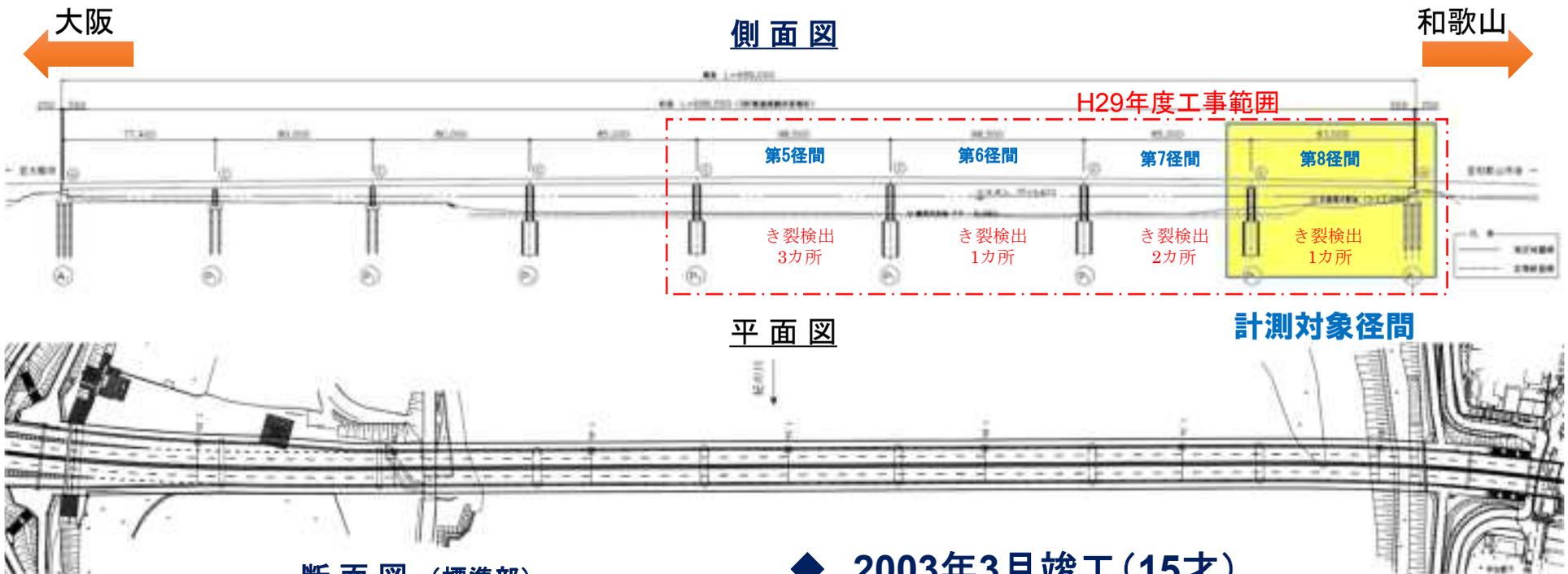
①実橋での応力計測 (補強後)

2. 応力測定

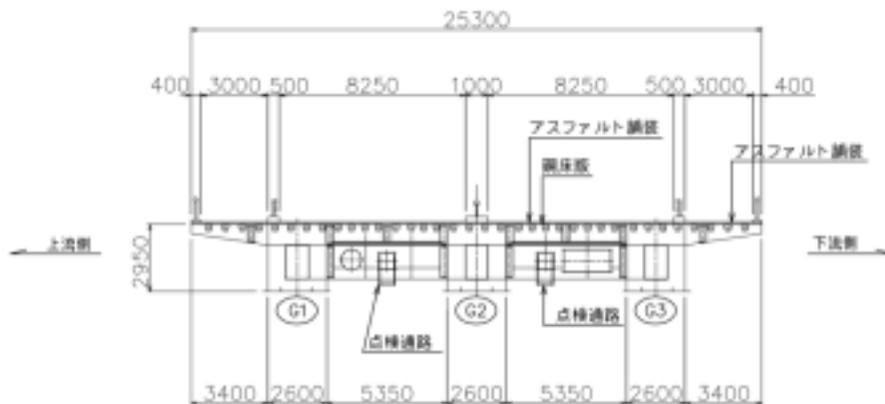
- ▶ 計測対象： 縦リブ・横リブ交差部の補強箇所
- ▶ 目的： 対策後の応力測定(対策効果の検証)
- ▶ 現地計測： 2018年8月25日～8月31日 実施
 - 8/27 動的載荷試験(試験車走行)
 - 8/28～8/31 72時間応力頻度測定

対象橋梁

8径間連続鋼床版箱桁橋



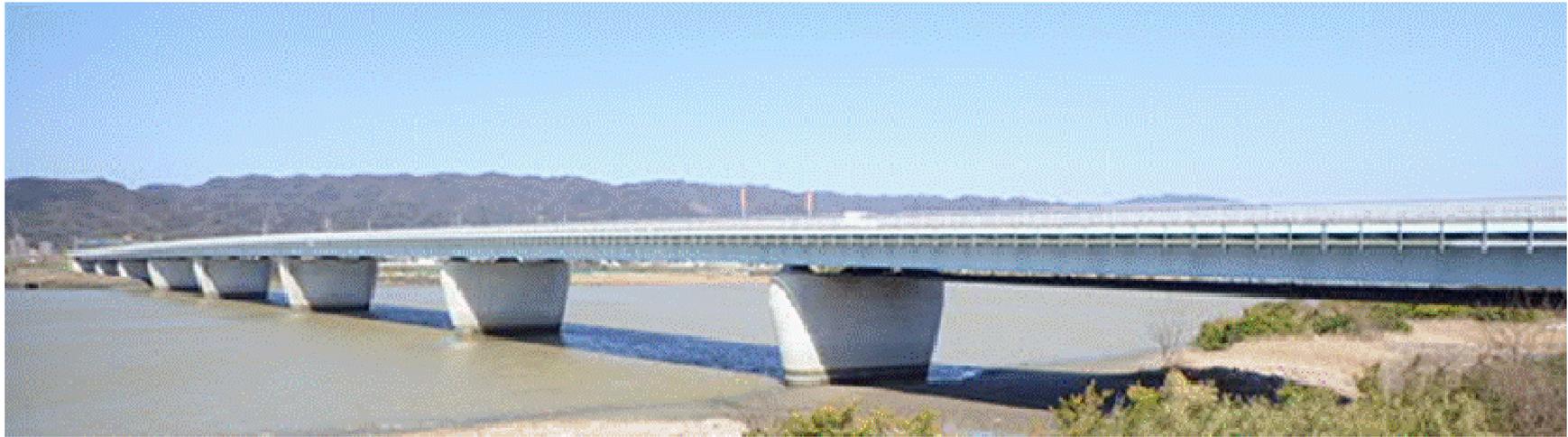
断面図 (標準部)

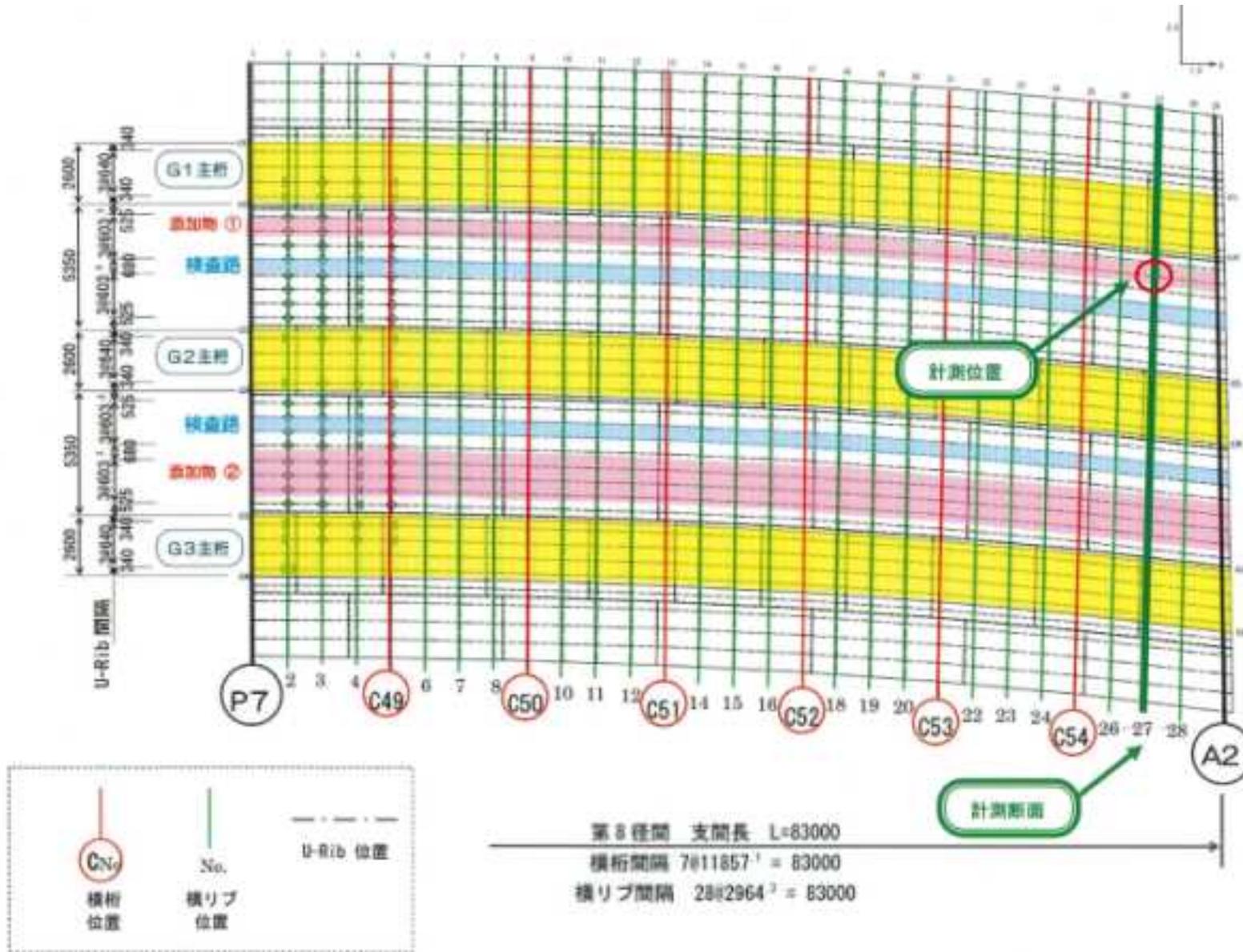


◆ 2003年3月竣工 (15才)

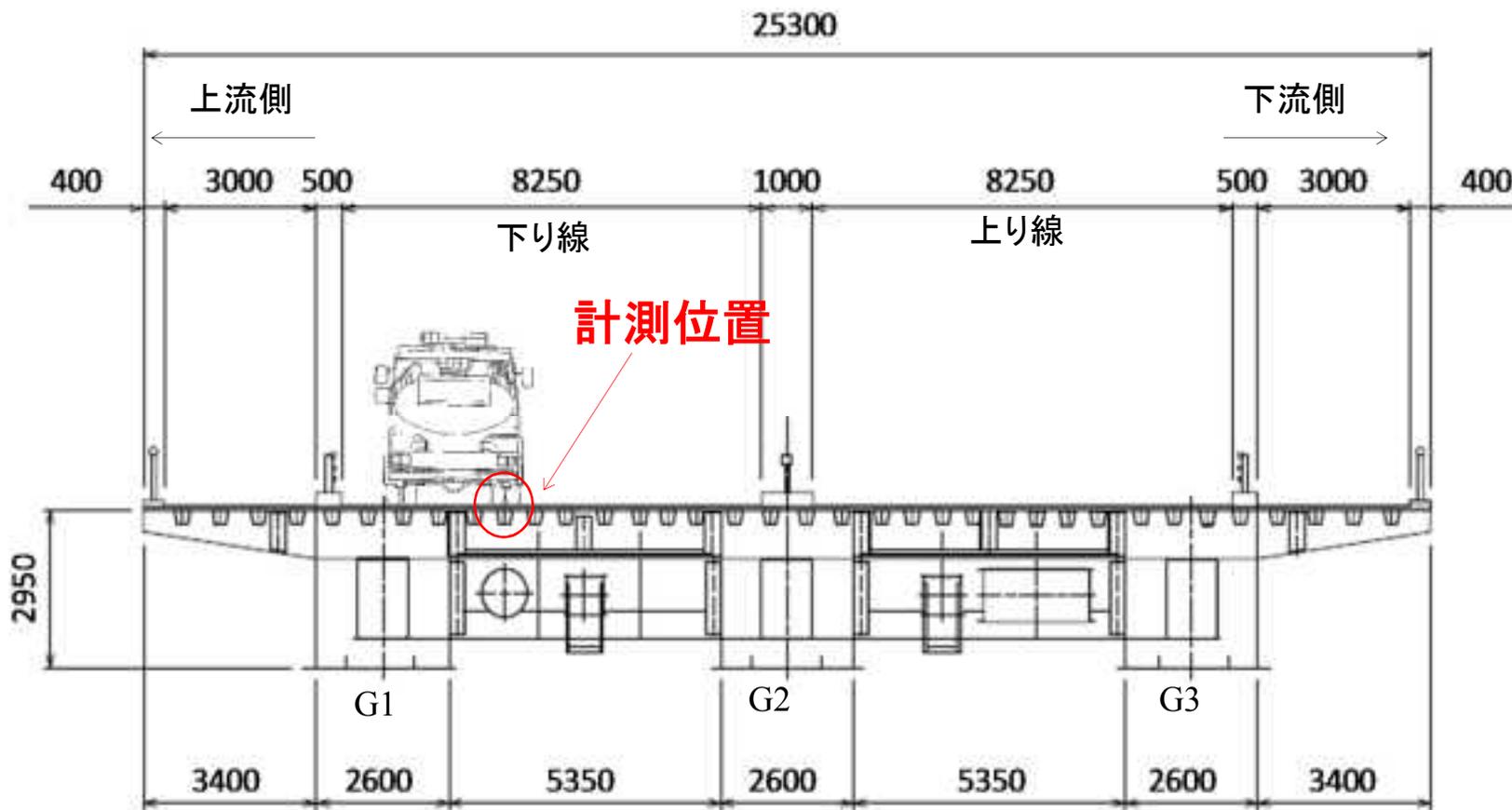
◆ 交通量:

	補強前	補強後
調査日	H29年10月	H30年10月
交通量(12時間)	25,123台	27,072台
大型車(12時間)	1,612台	1,787台
大型車混入率	6.4%	6.6%





第8径間 (P7-A2)



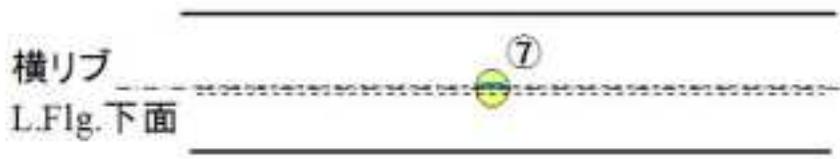
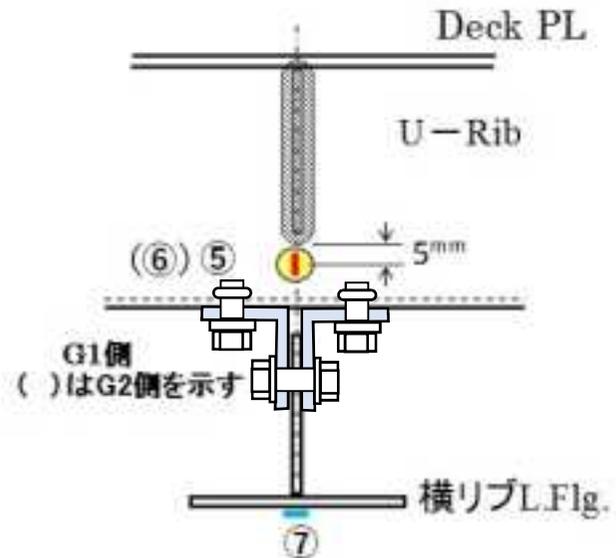
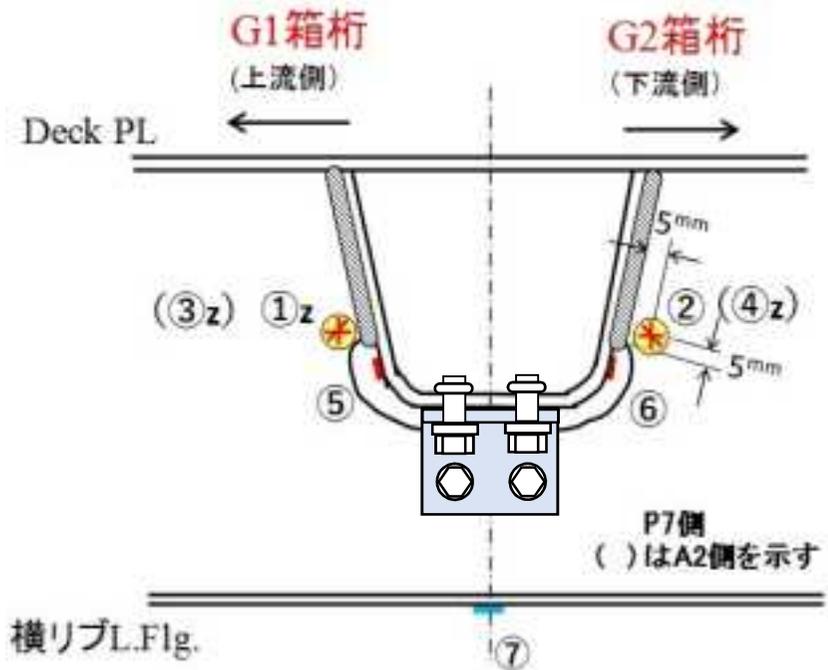
測定位置



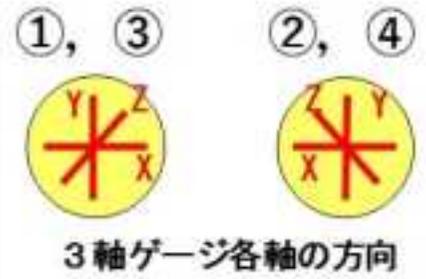
走行試験載荷車(散水車≒13t)



走行試験載の状況



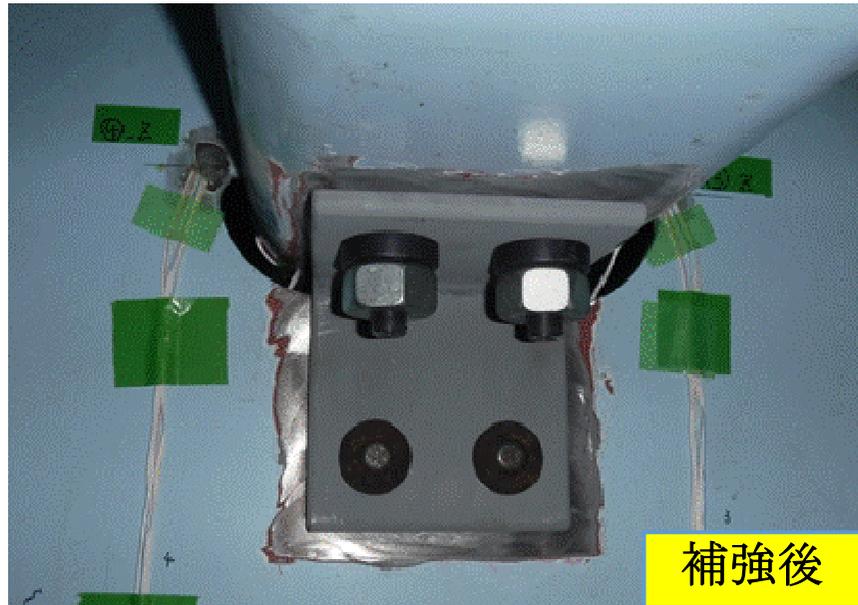
	3軸 (1mm) 4枚
	1軸 (1mm) 2枚
	1軸 (5mm) 1枚
合計	7枚



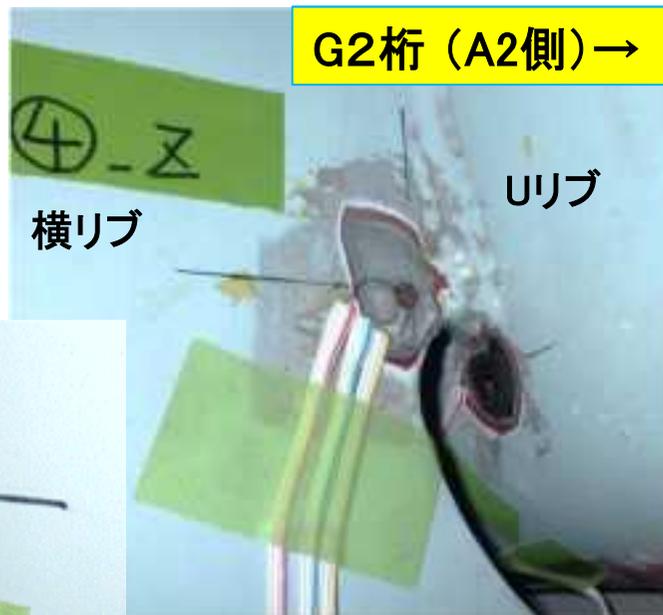
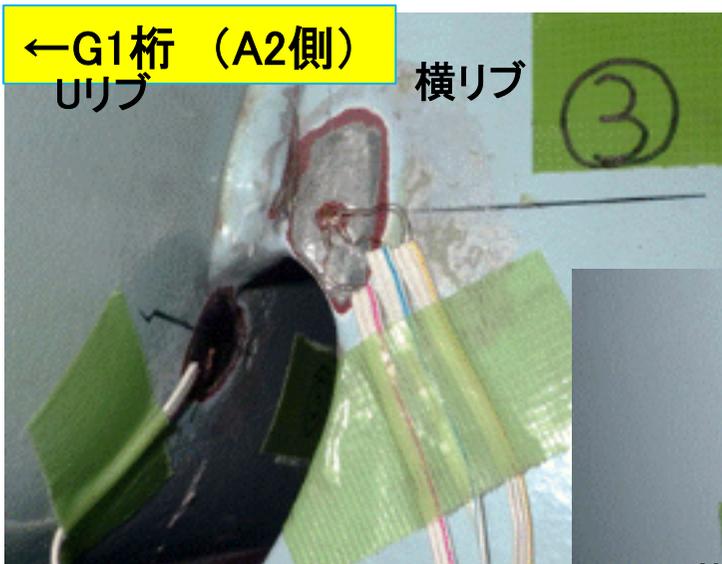
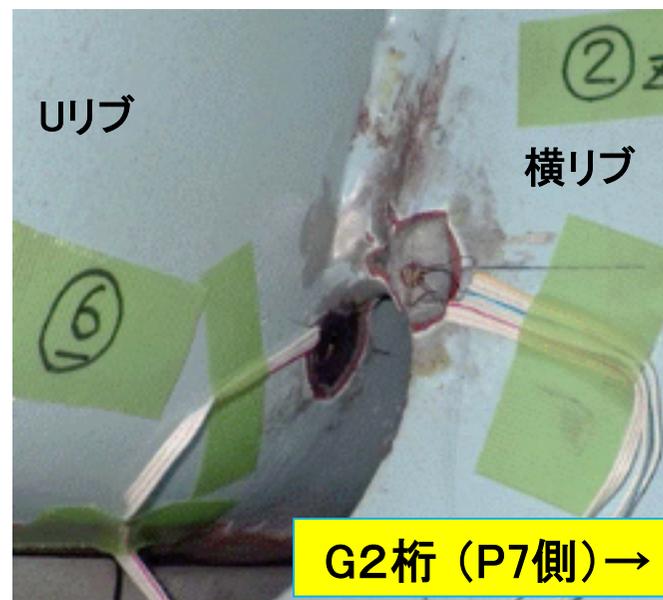
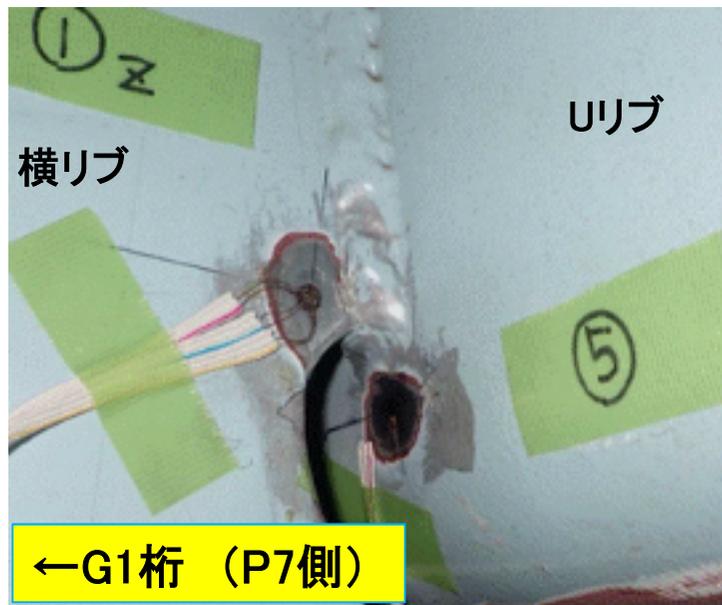
ゲージ位置



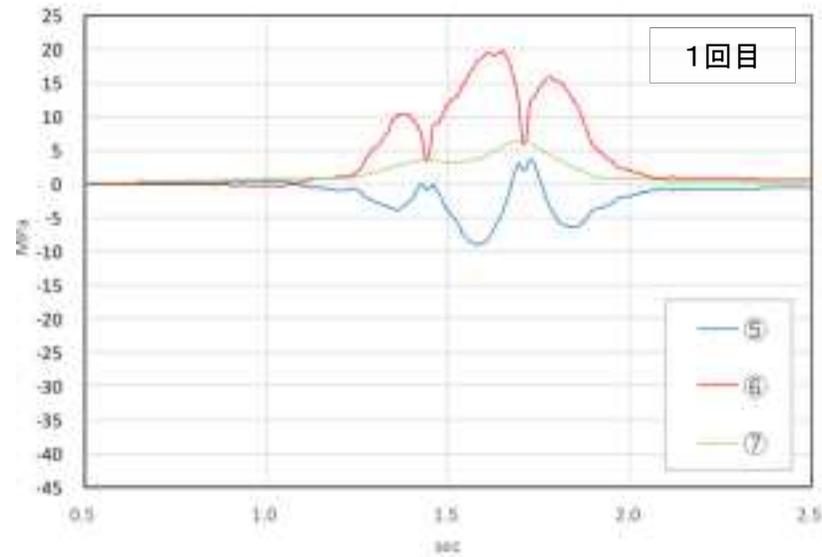
補強前



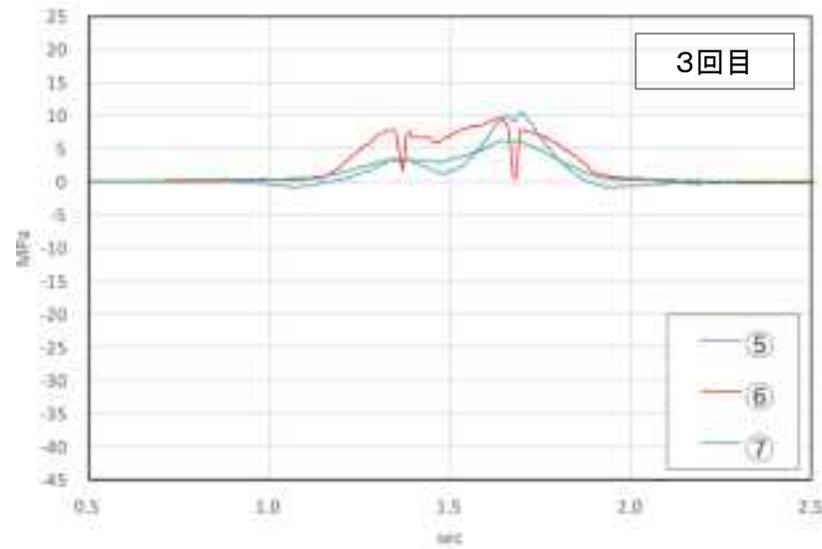
補強後



補強前



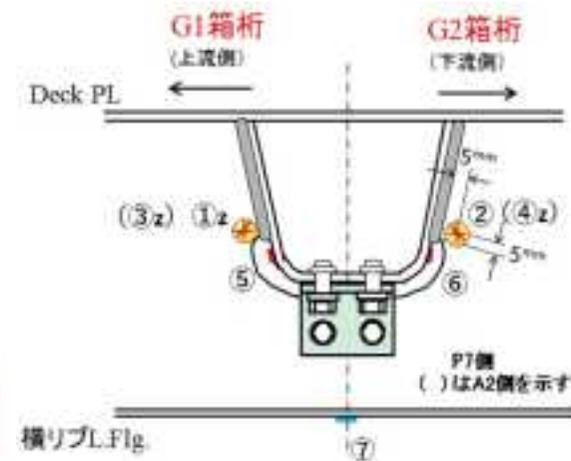
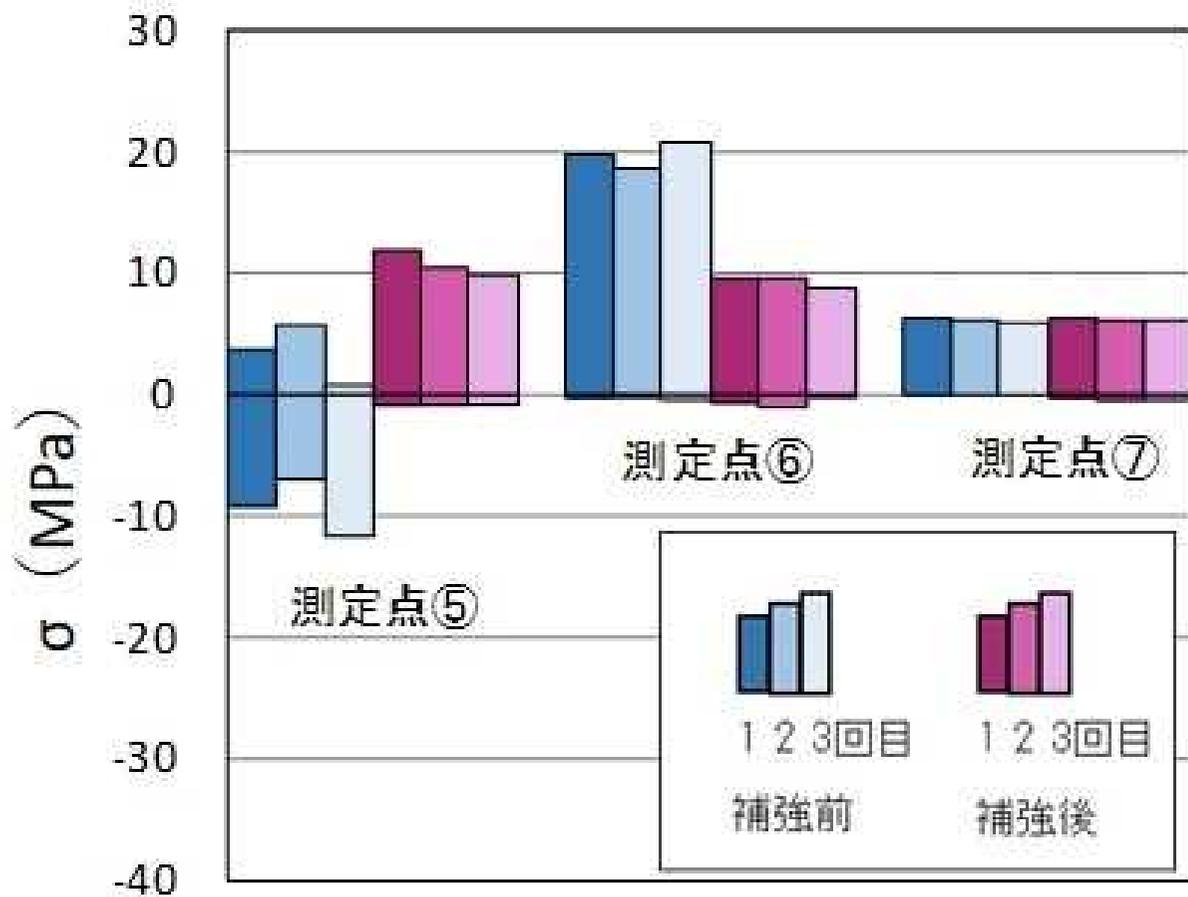
補強後



動的載荷試験結果 - 応力波形 補強前・後の比較

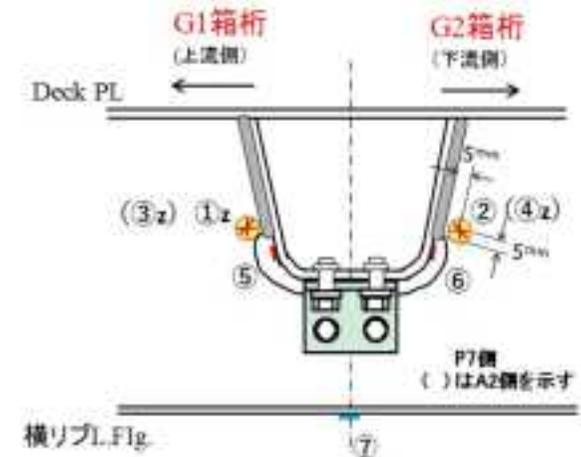
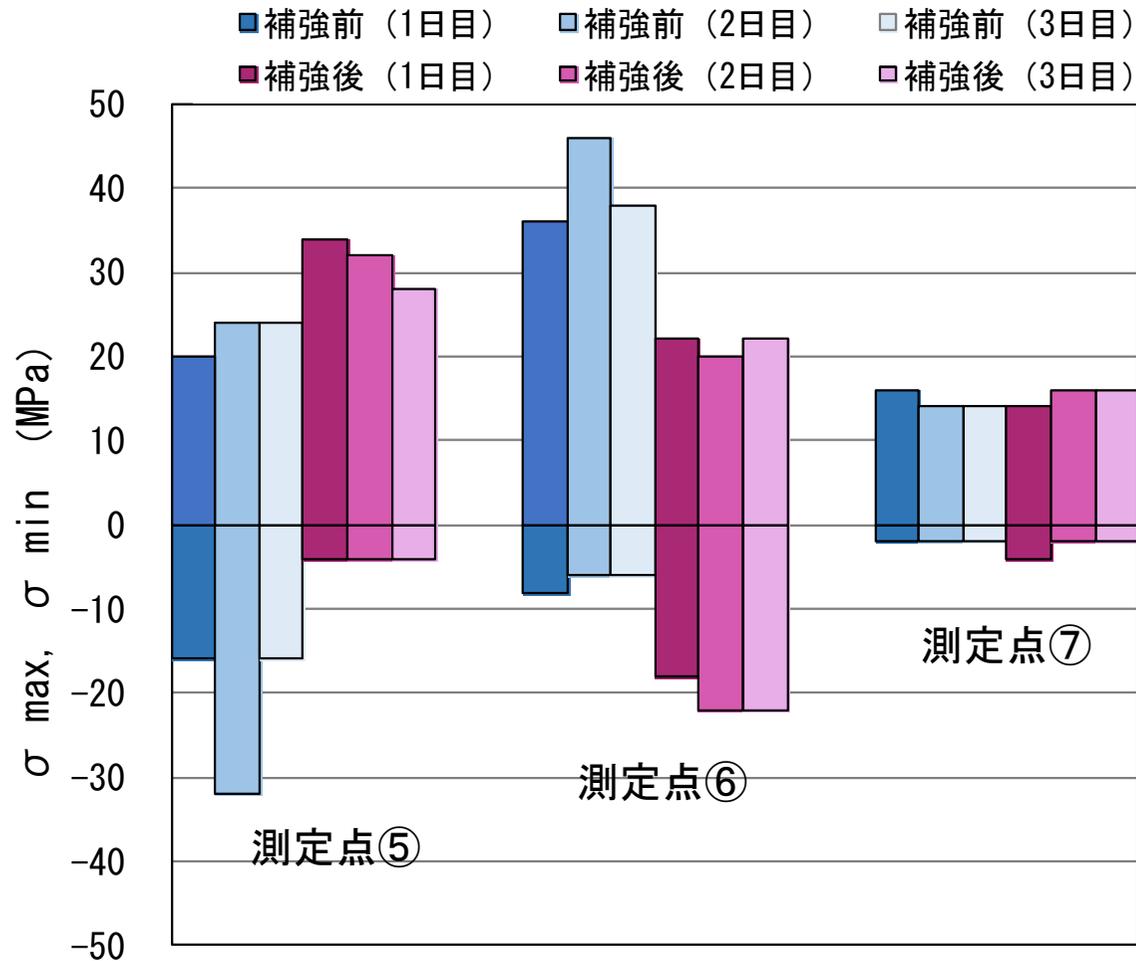
3. 測定結果

3.1 動的載荷試験結果

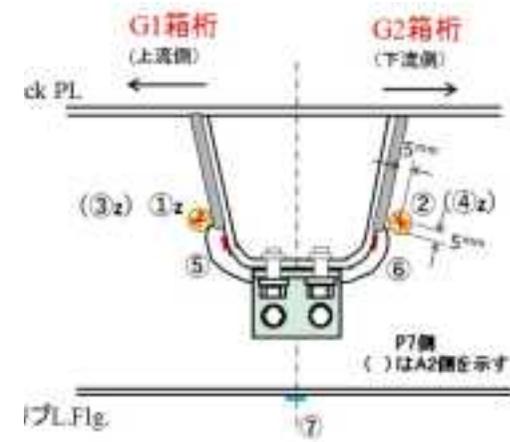
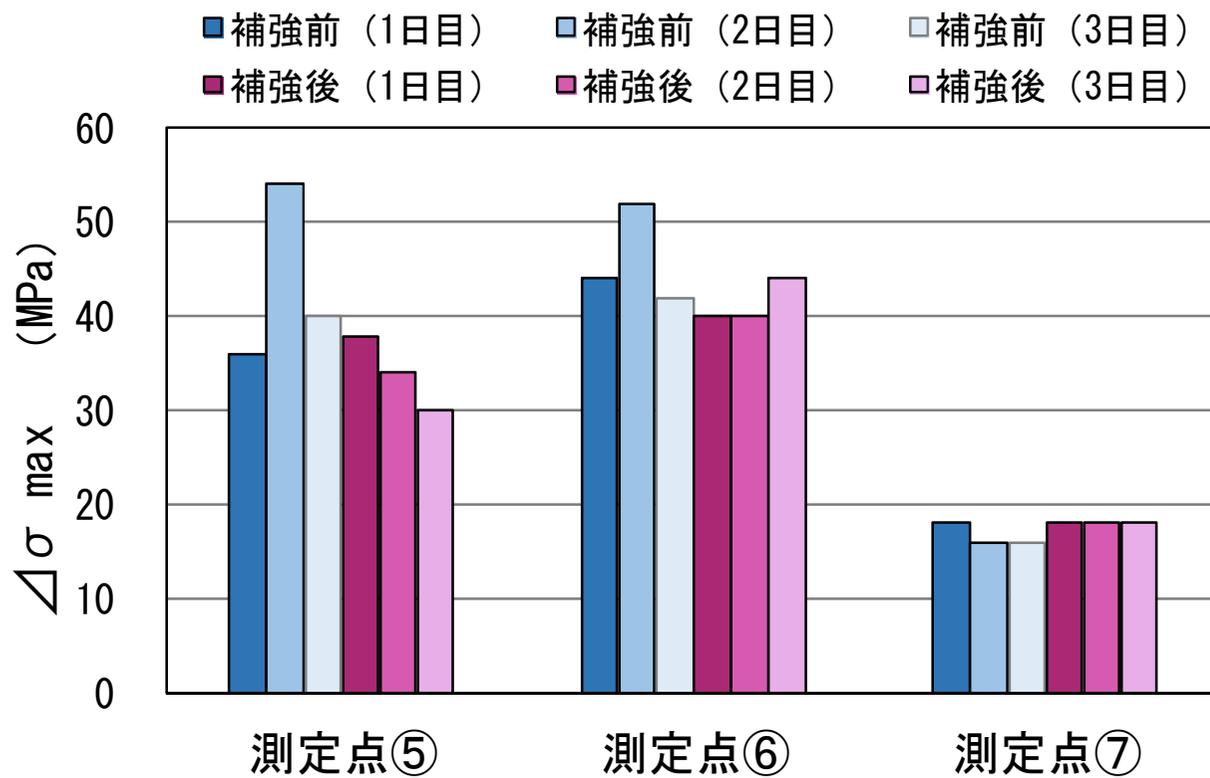


動的走行試験 最大値 — 補強前・後の比較 (Uリブ)

3.2 72時間応力頻度測定結果

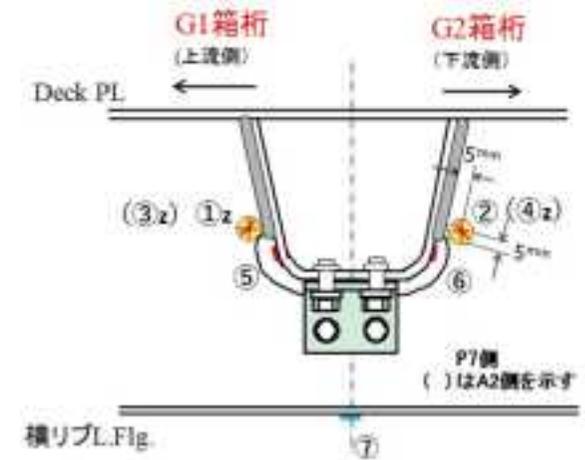
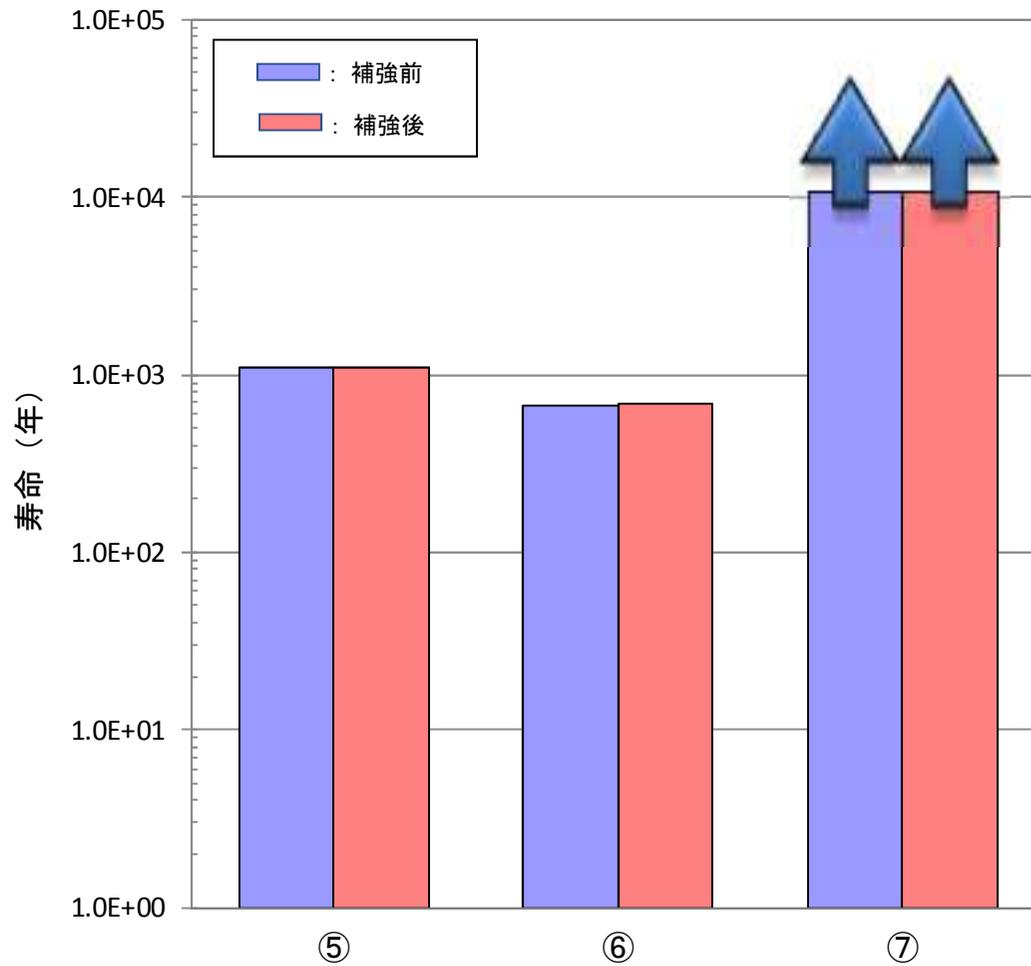


応力頻度 ピークバレー法による最大・最小応力 補強前・後の比較(Uリブ)

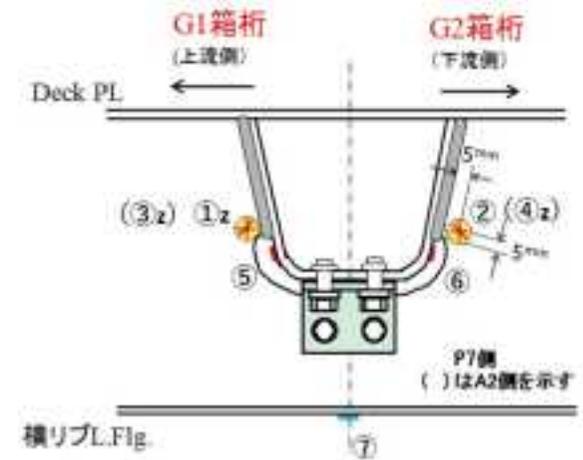
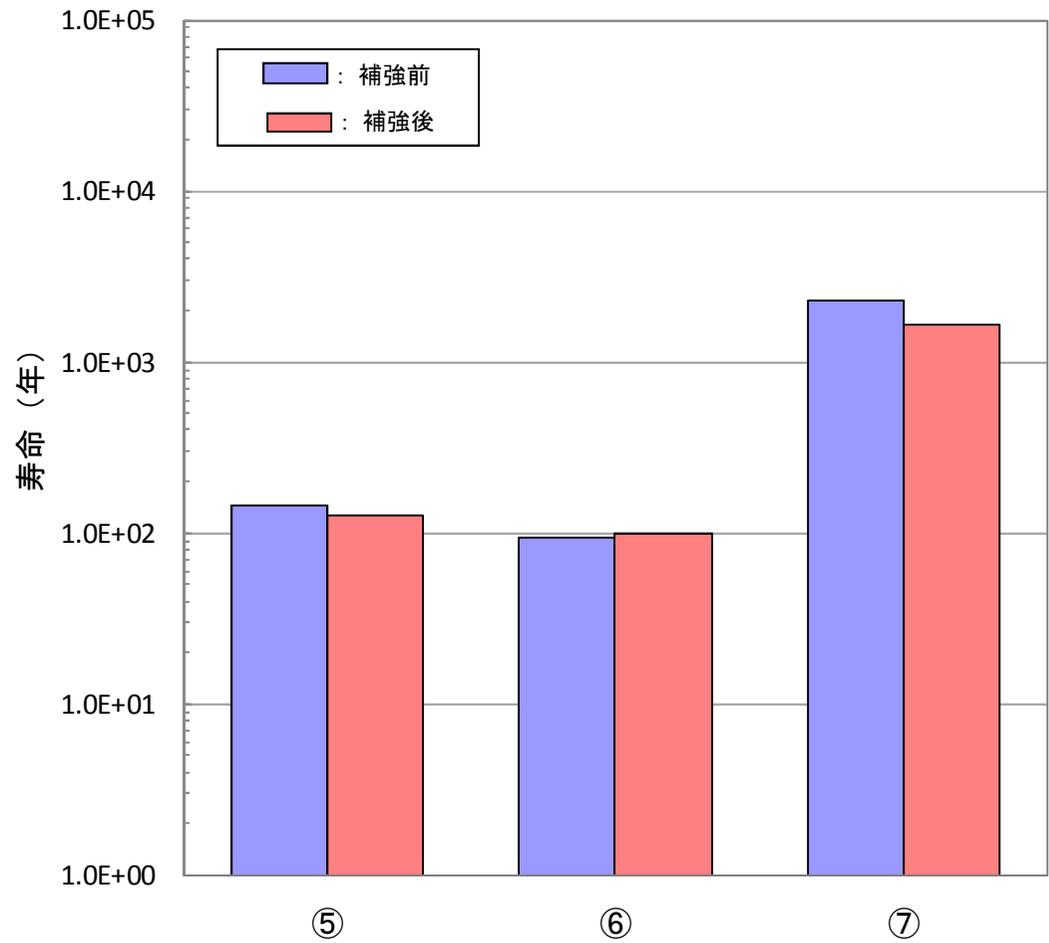


応力頻度 レインフロー法による最大応力範囲 補強前・後の比較(Uリブ)

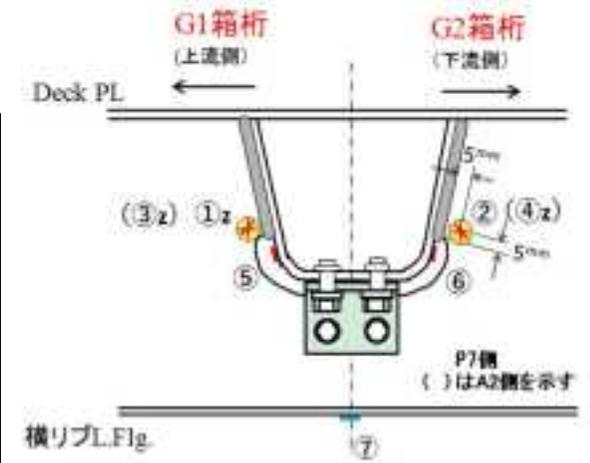
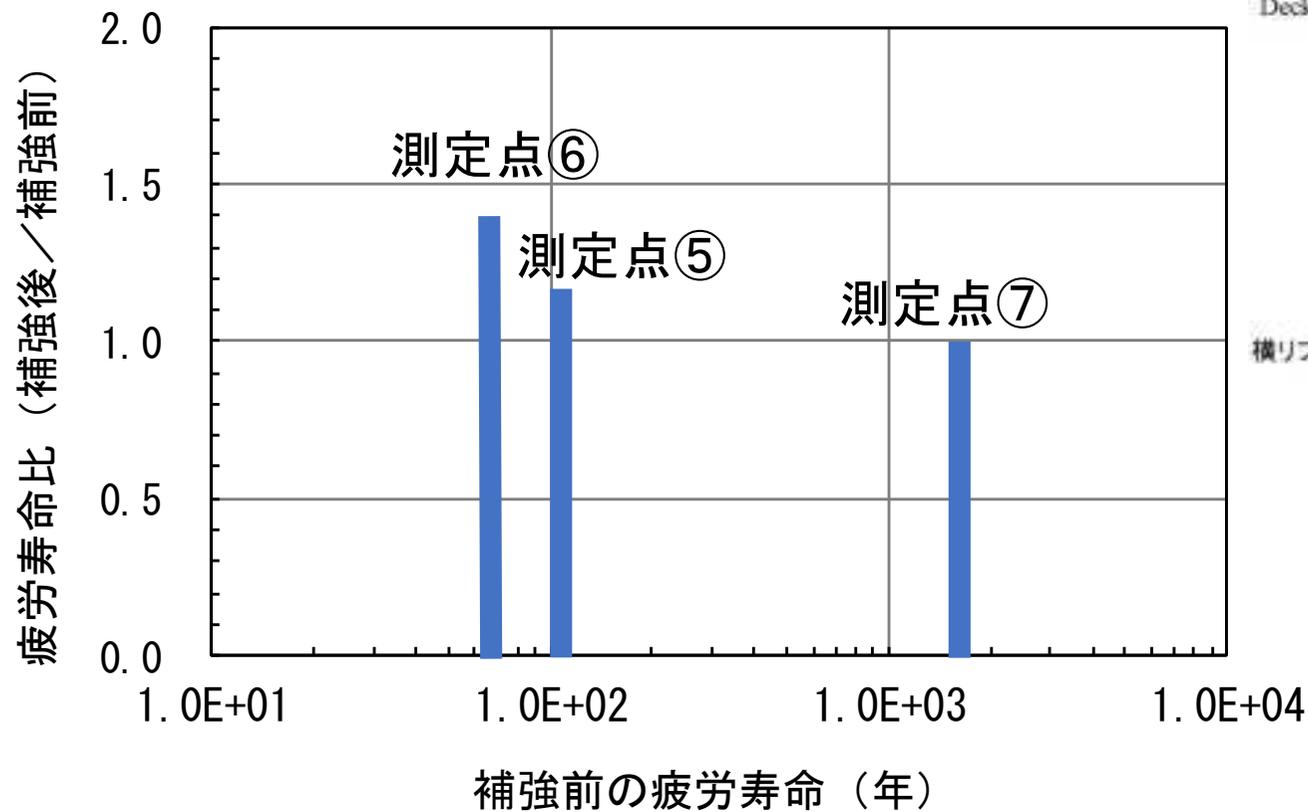
◆疲労寿命



推定疲労寿命 補強前・後の比較(G,D等級)



推定疲労寿命 補強前・後の比較(H'等級)



疲労寿命比 (補強後／補強前) (Uリブ)

4. まとめ

4.1 動的載荷試験

- ・Uリブ止端部については、補強前は、測定点⑥で20MPa程度の引張、測定点⑤で-10MPa程度の圧縮が発生していたが、補強後は、両方とも10MPa程度の引張に収まっており、補強後の応力が最大で補強前の約50%に減少した。
- ・横リブ下フランジの測定点⑦では、補強前後の応力値が6MPa程度でほとんど変わらなかった。

4.2 応力頻度測定

4.2.1 最大・最小応力度について

- ・ Uリブ止端部については、補強前の測定点⑥の最大46MPaの引張と測定点⑤の-30MPaの圧縮が、補強後は、測定点⑥が20MPa程度に半減し、測定点⑤が30MPa程度の引張に変化した。
- ・試験車両(後軸8.4t)走行時の横リブ下フランジ(測定点⑦)の応力(6MPa)と比較すると、応力頻度測定時(16MPa)に試験車両の約2.7倍の22t程度の軸重が通過したと推定される。

4.2.2 応力範囲について

- ・Uリブ止端部については、補強後の応力範囲は、測定点⑤で補強前の約70%に(54MPa→38MPa)、測定点⑥では補強前の約85%に(52MPa→44MPa)減少した。
- ・横リブ下フランジの補強後の応力範囲は補強前よりも若干増加した。

4.2.3 疲労寿命について

- ・応力頻度測定結果では発生応力範囲が小さく、特に測定点⑦の寿命が ∞ となり、比較が難しいため最低等級のH'等級の設計曲線を用い、さらに測定点⑦の疲労寿命の違いで補正して比較した結果、補強後の寿命は、最も単寿命の測定点⑥で補強前の1.4倍となった。

② FEM解析 (補強後)

背景

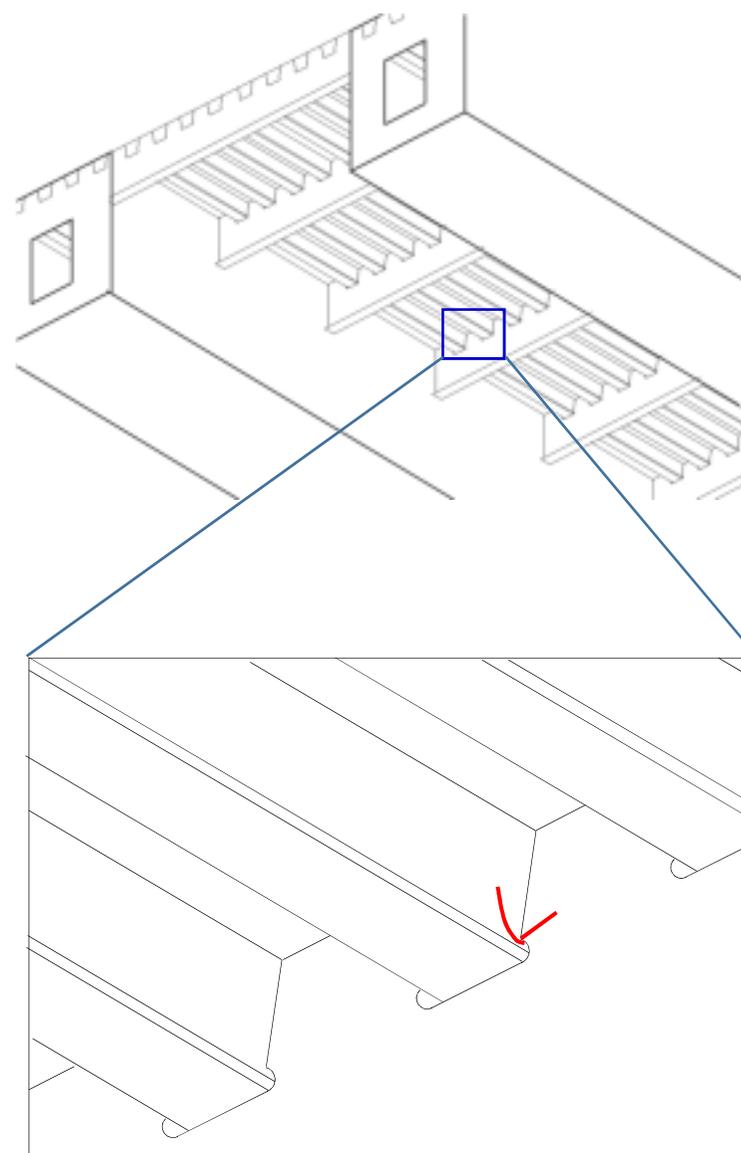
鋼床版Uリブ横リブ交差部

- ・横リブスロット部からのき裂

昨年度は実橋を再現できる解析モデルを作成し、実橋における応力挙動の把握実施



- ・解析モデルを活用し、既設鋼床版のき裂対策の改善効果を検討

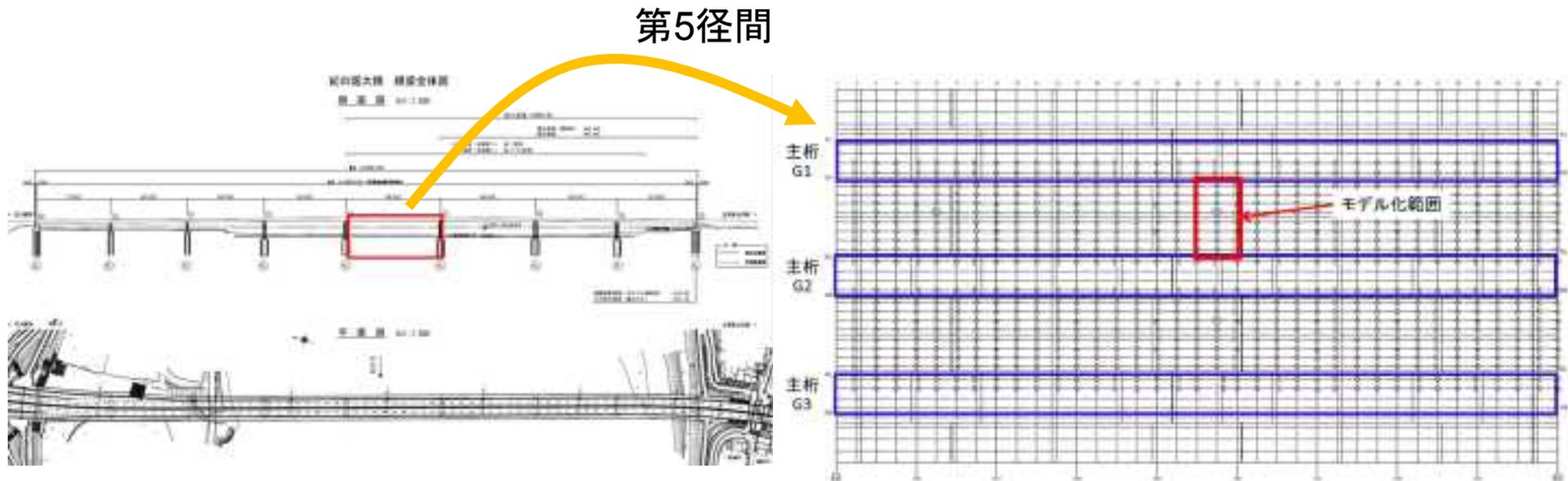


目的

昨年度作成した実橋FEMモデルを改良し、補強前後の応力分布を比較することによって補強工法の効果を検討する。

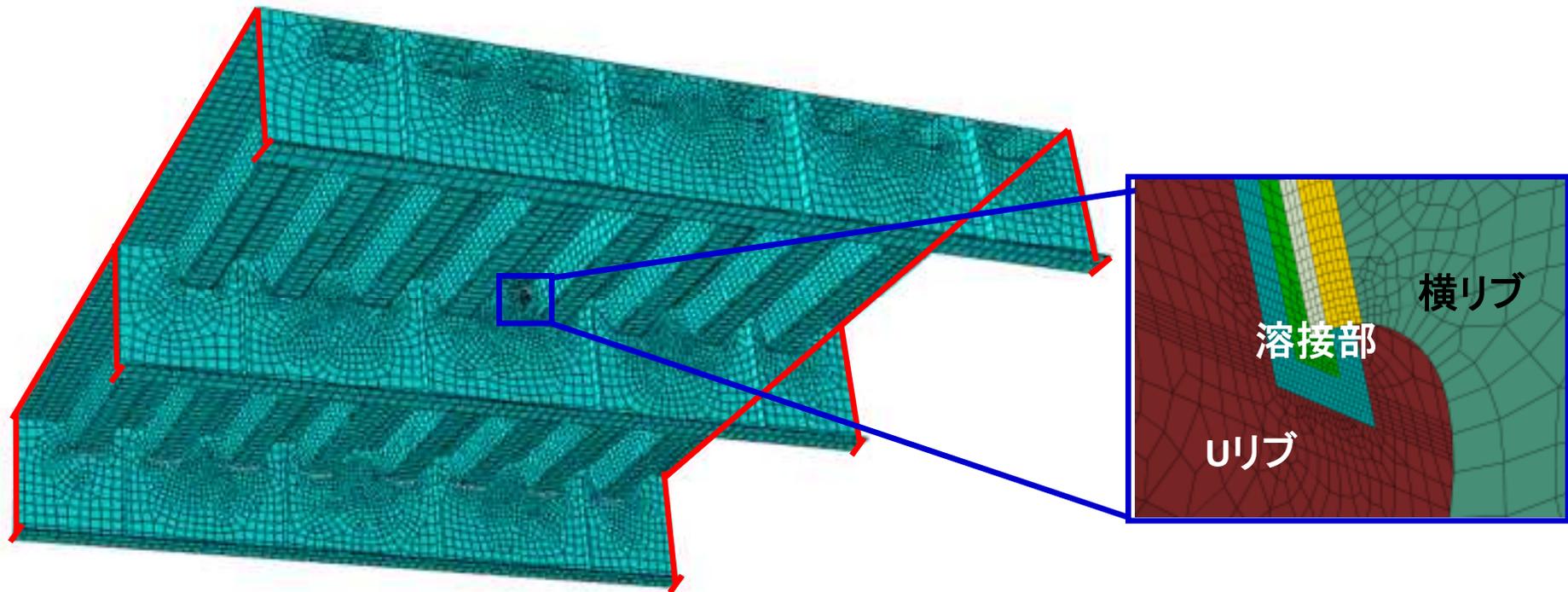
着目箇所

塗膜割れが多数発見された位置を選定



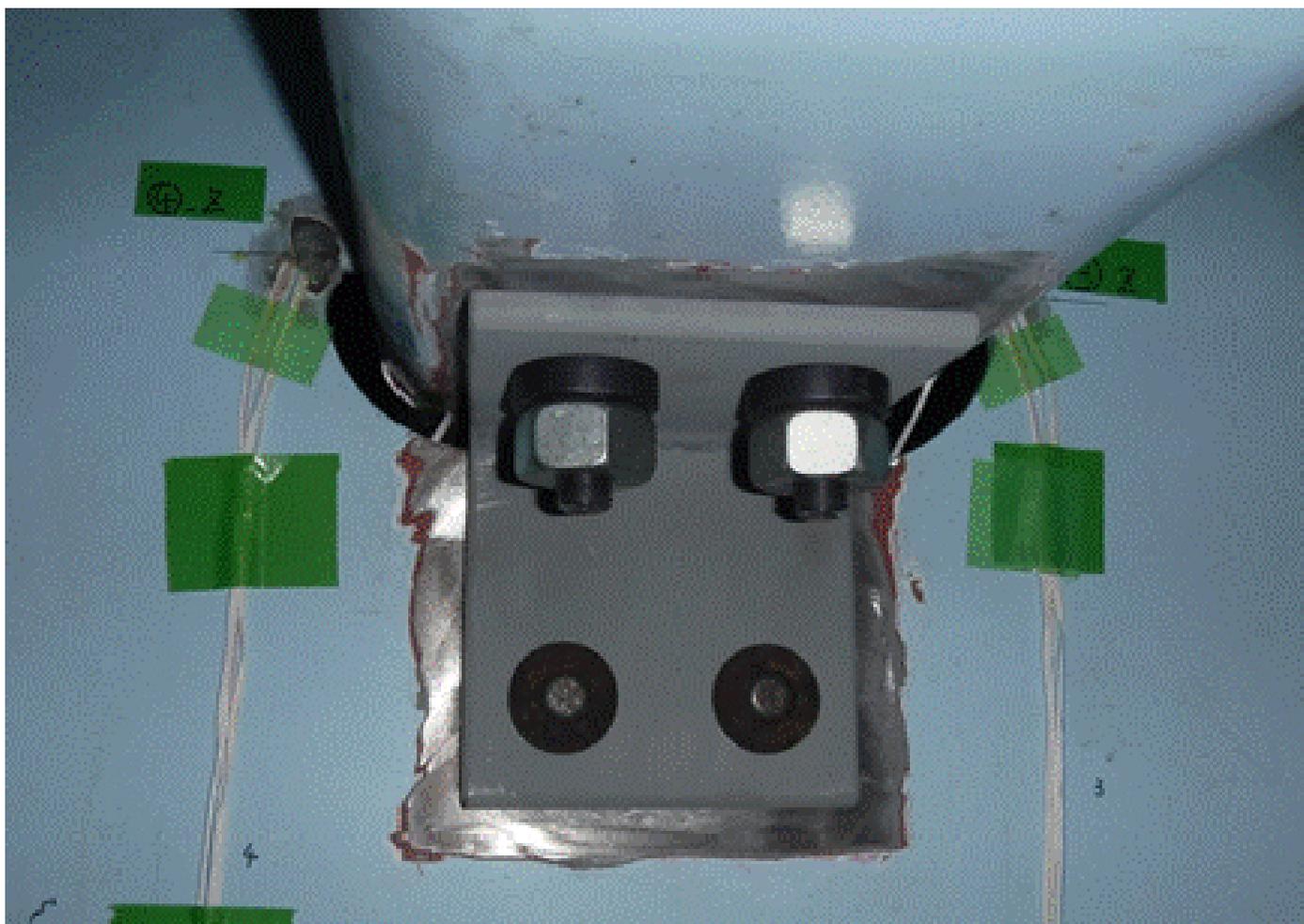
解析モデル

- 板状のシェル要素によるモデル化を基本とし，着目部の一部のみソリッド要素を用いてメッシュを細分化した。
- 境界条件として，赤線位置で全方向の変位を固定した。

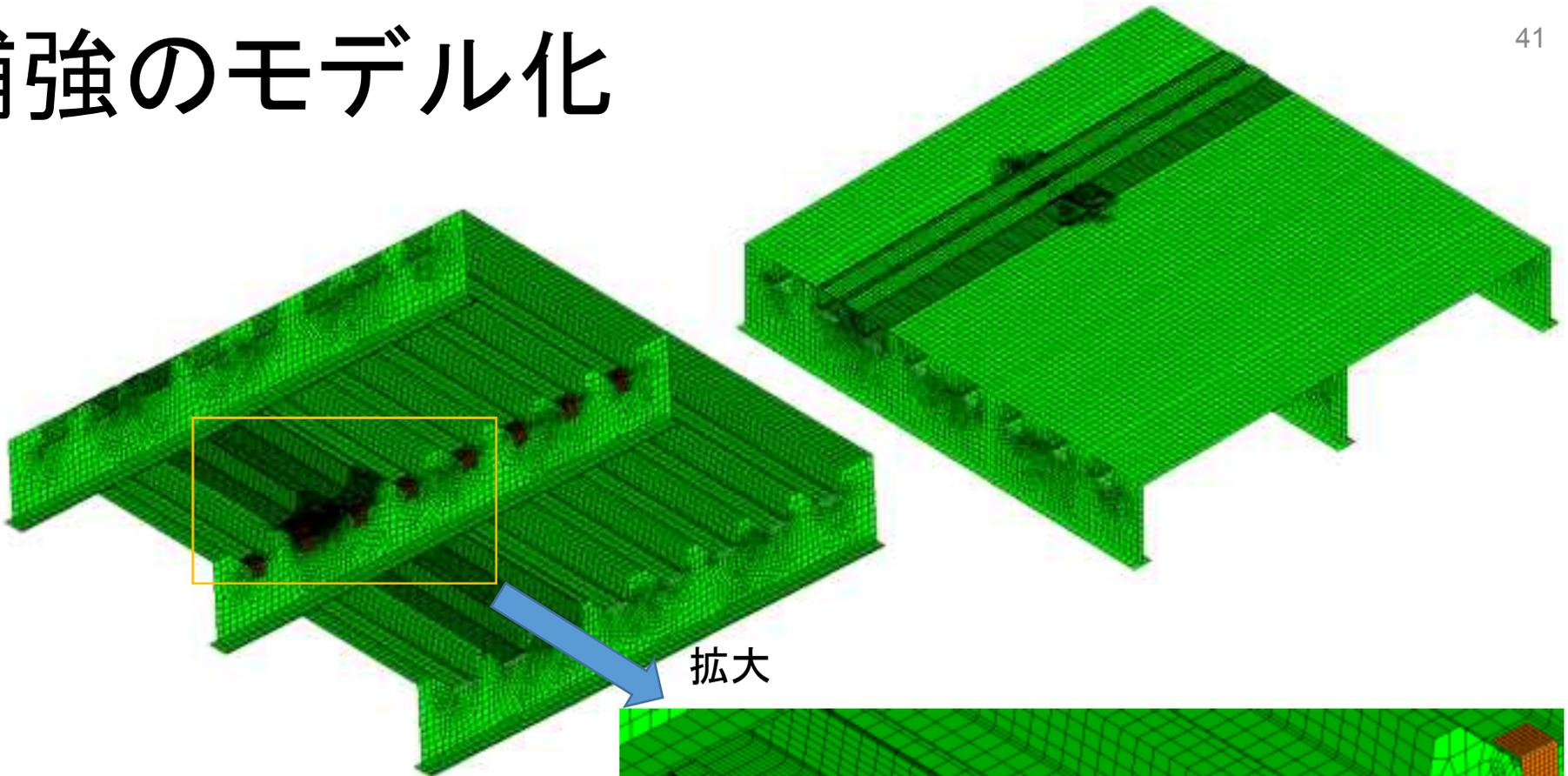


補強工法

対象工法： アングル材でUリブ下面を横リブに固定



補強のモデル化

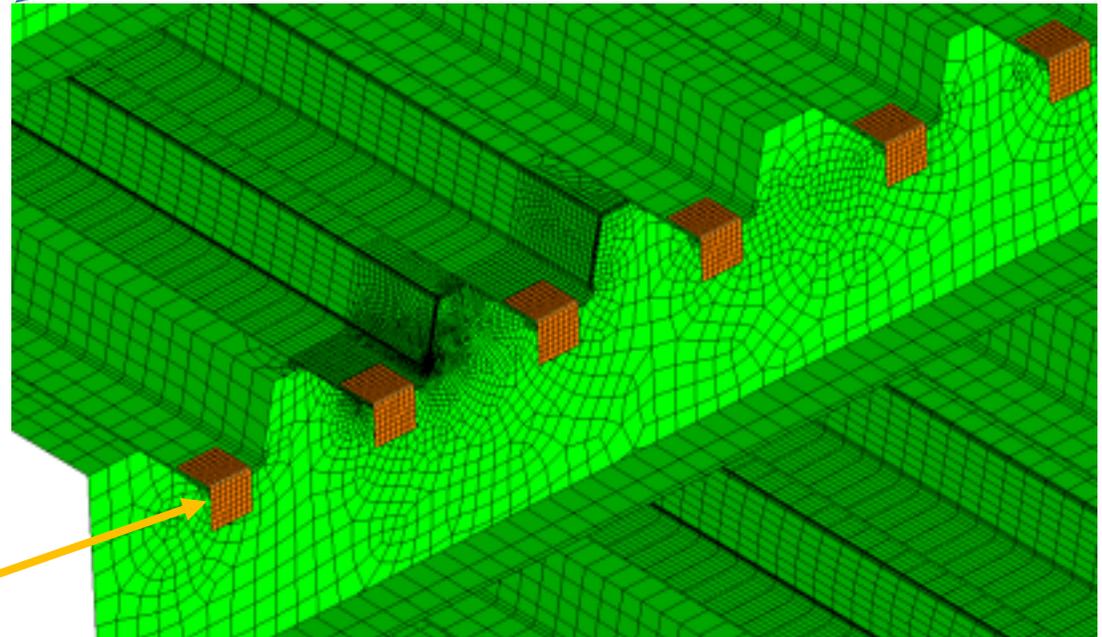


拡大

G1桁から2本目のUリブに着目

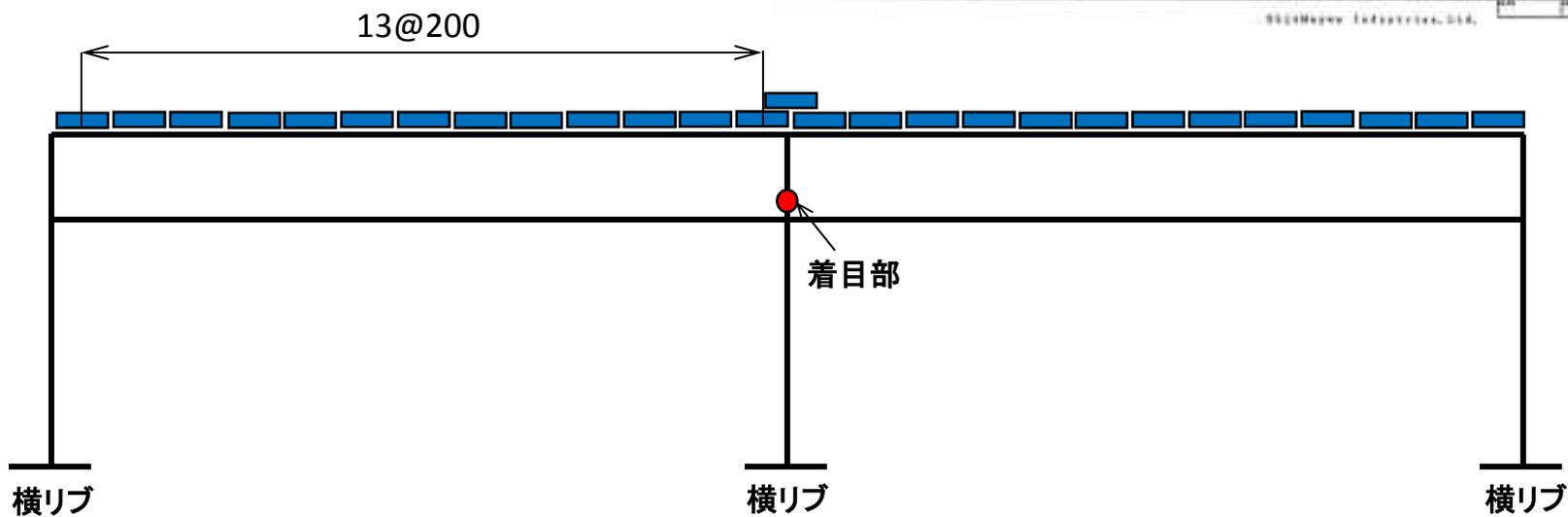
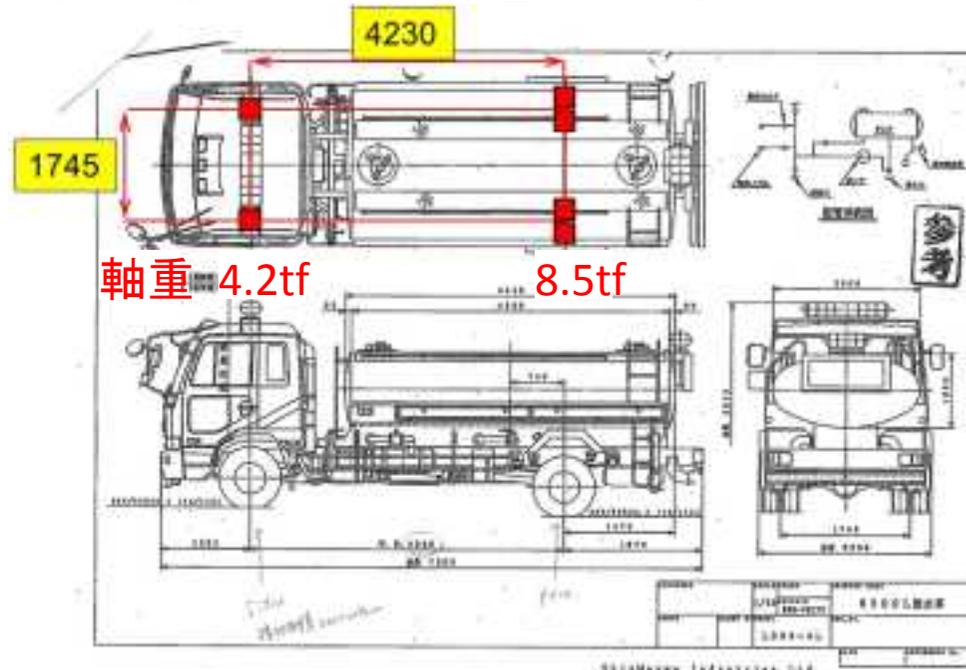
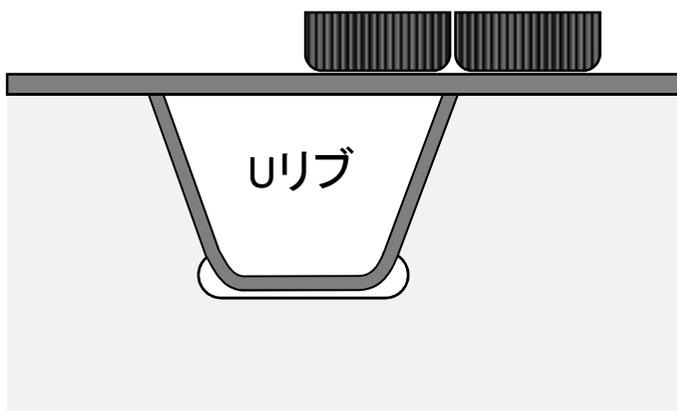
アンゲル材をモデル化
→ Uリブと横リブに固定
(解析ソフトのTie機能を使用)

補強アンゲル



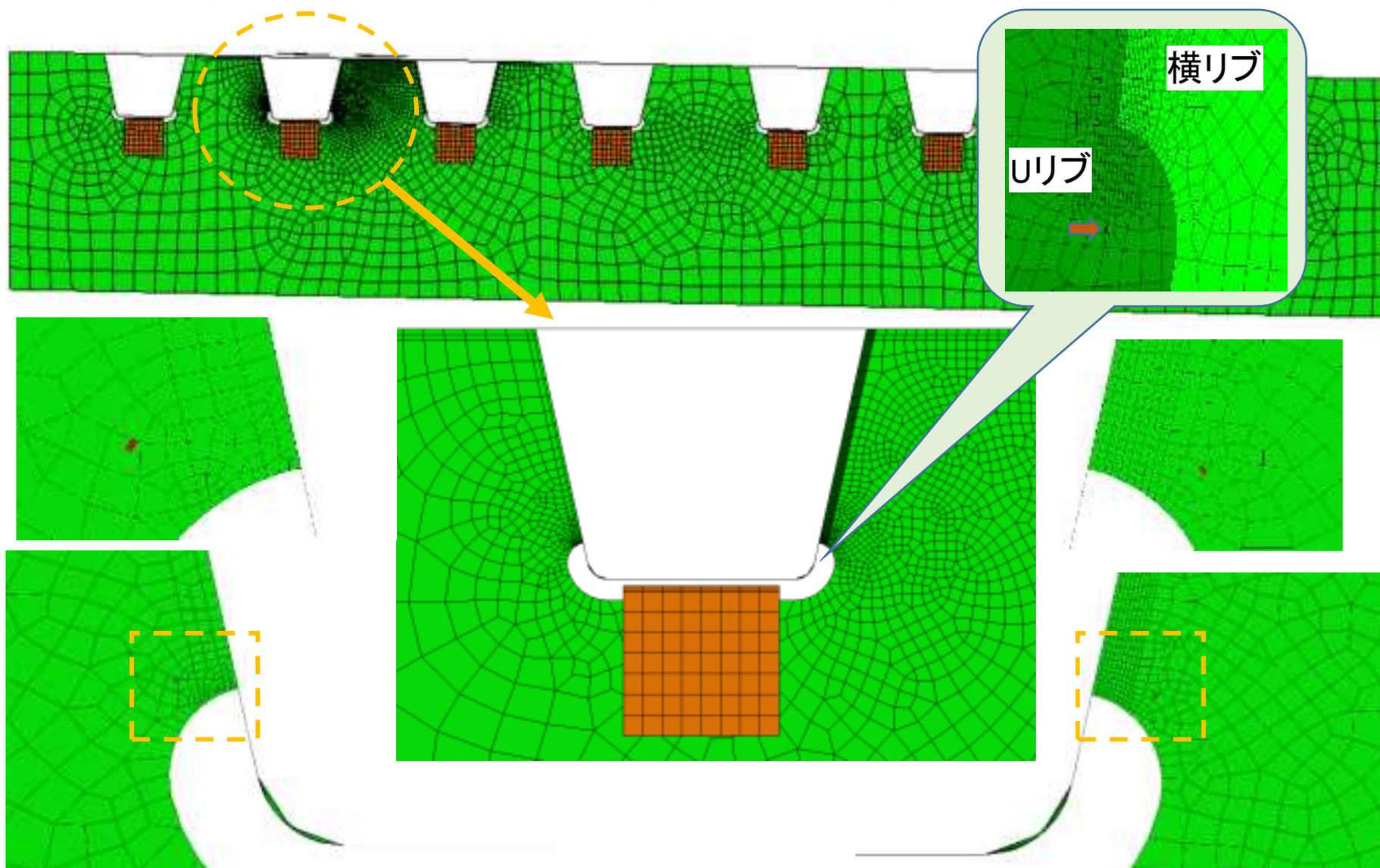
荷重条件

昨年度の検討と同様に，走行試験で用いた散水車の後輪をモデル化．



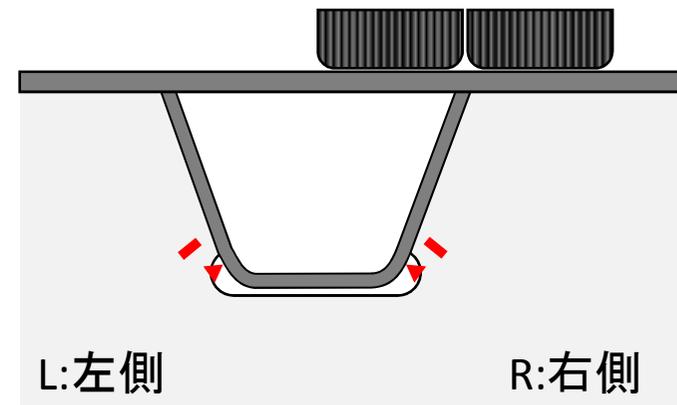
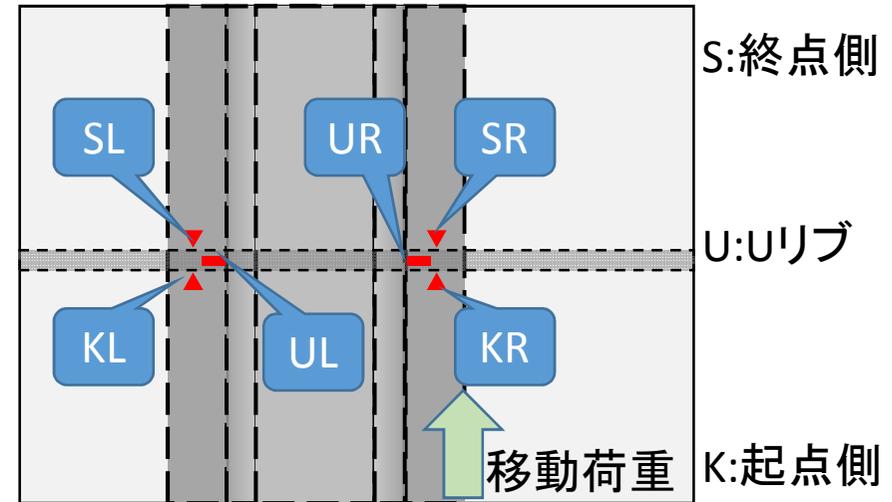
応力の結果出力位置

- 実橋のひずみゲージ貼り付け位置と大体同じ.



着目位置(ゲージ)名称

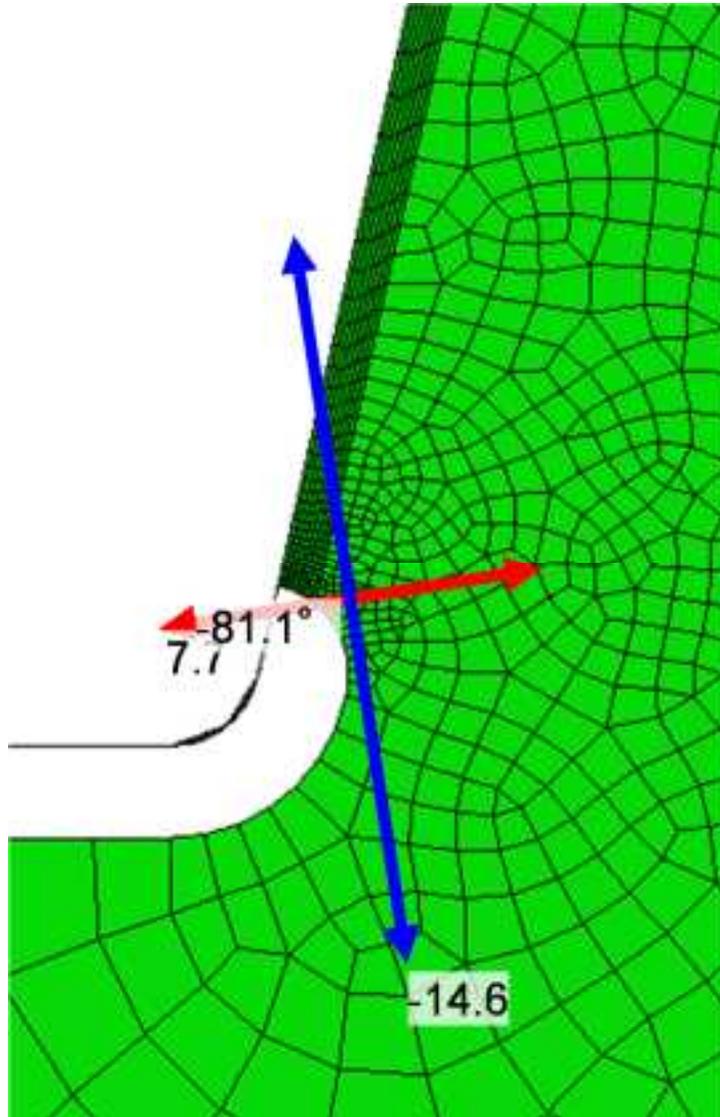
着目箇所6か所について
右図の様に命名



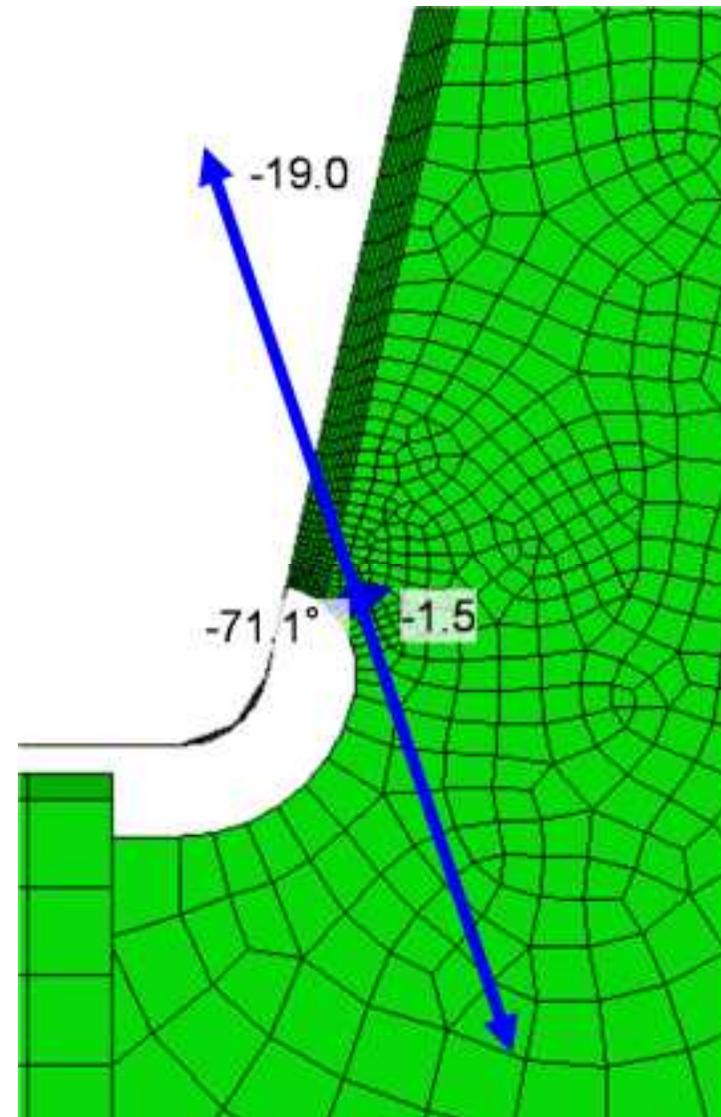
主応力の比較 KR

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

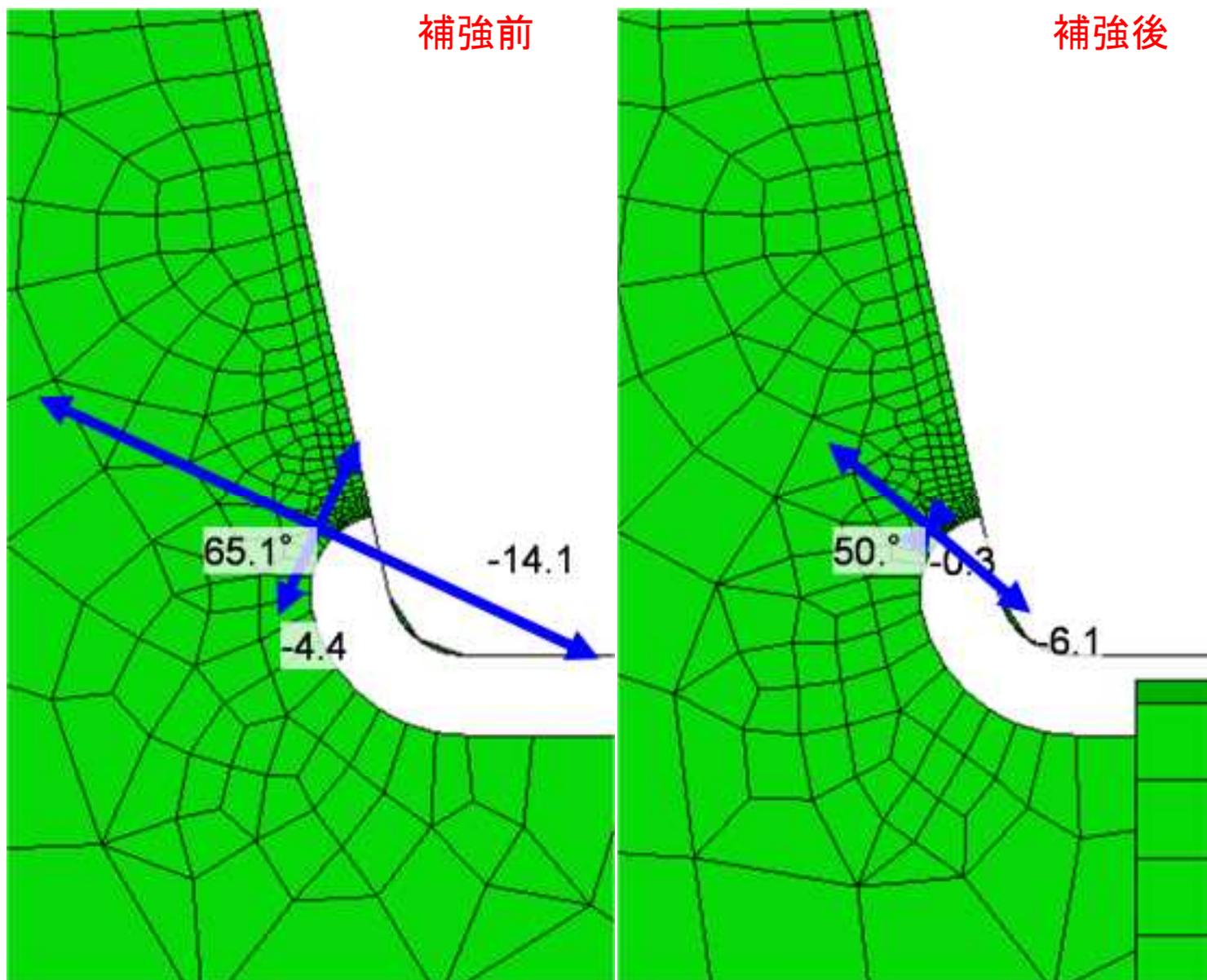


補強後



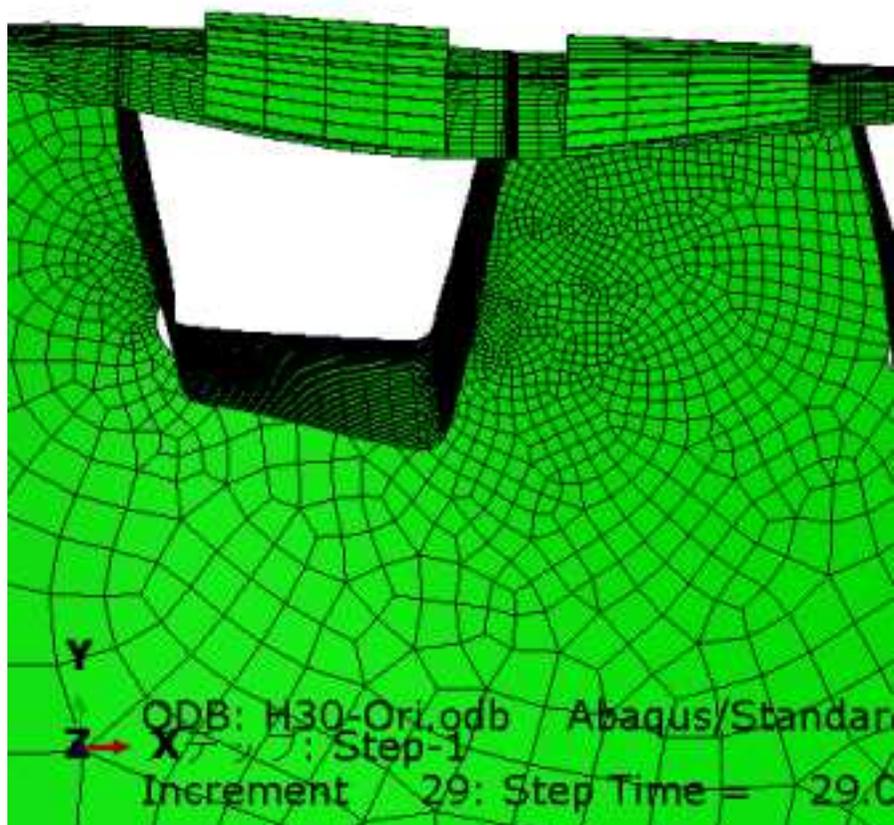
主応力の比較 KL

載荷位置：横リブから1390mm終点側(最大主応力ピーク位置)

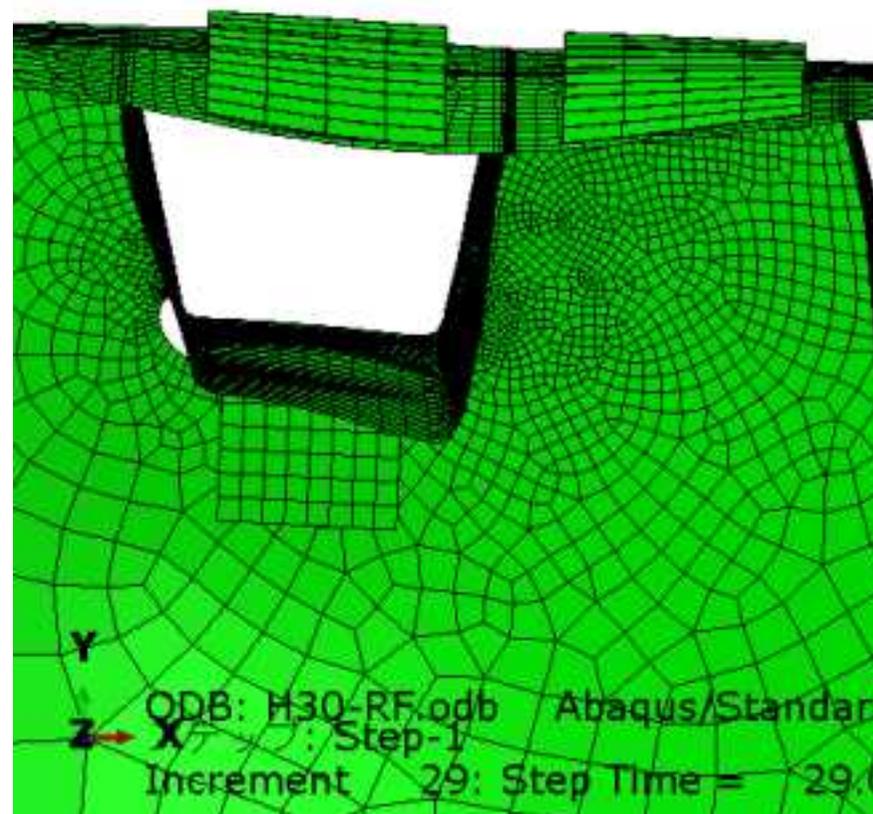


変形図 (Uリブの応力最大時)

載荷位置：横リブから1240mm起点側



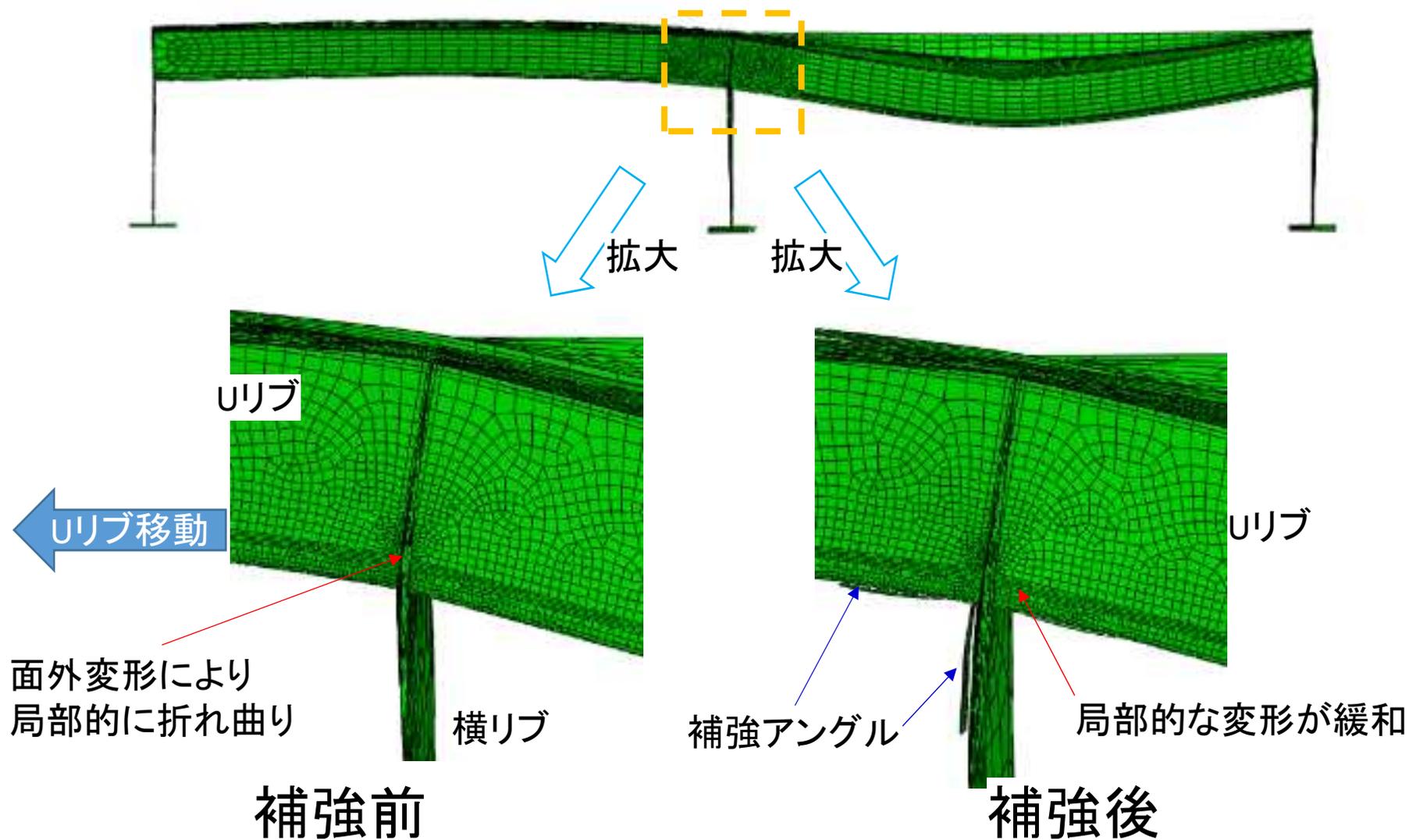
補強前



補強後

変形図 (KR部応力着目時)

載荷位置: 横リブから1290mm終点側



各径間のき裂数および横リブ間隔

大阪 ←

和歌山 →

側面図

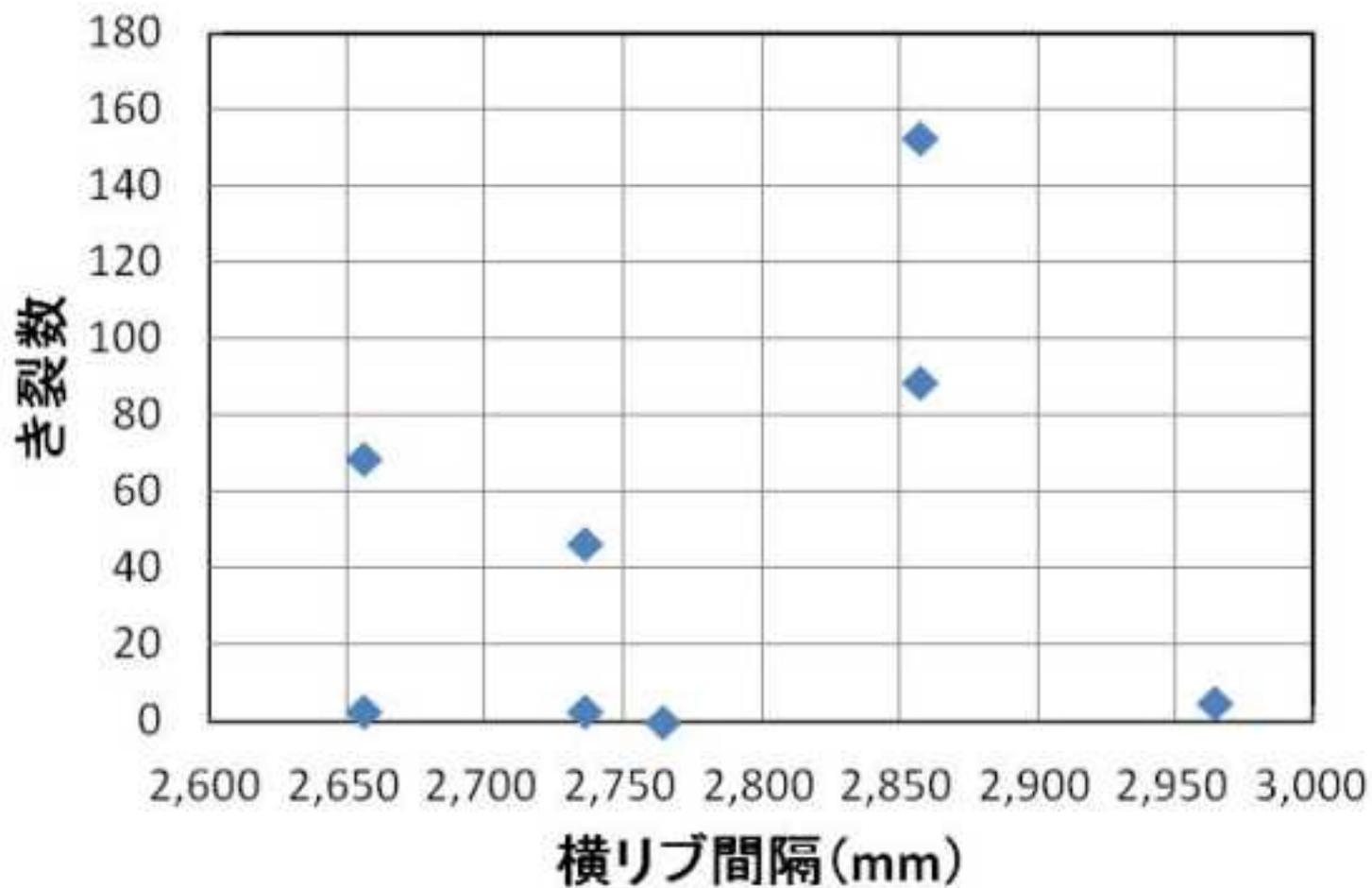


計測対象径間

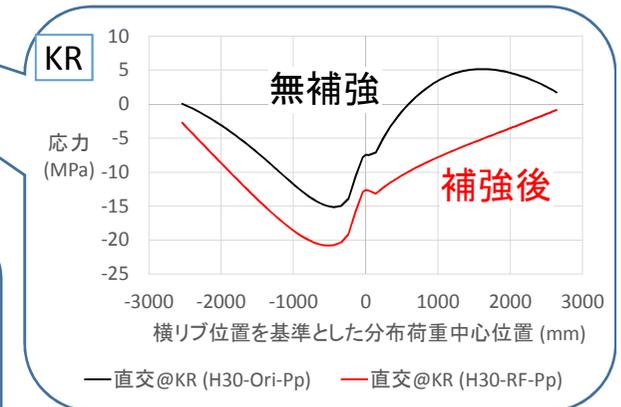
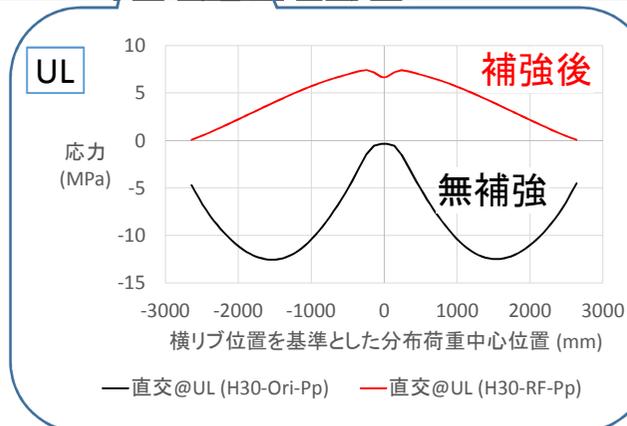
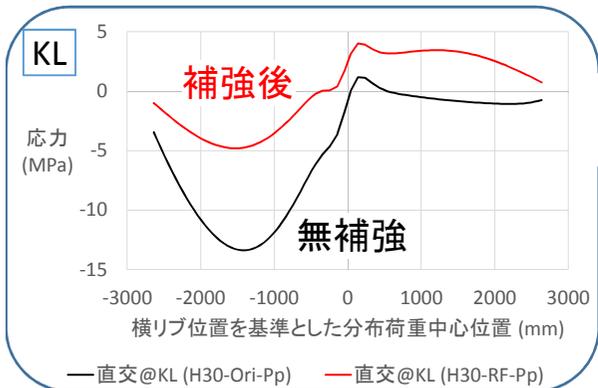
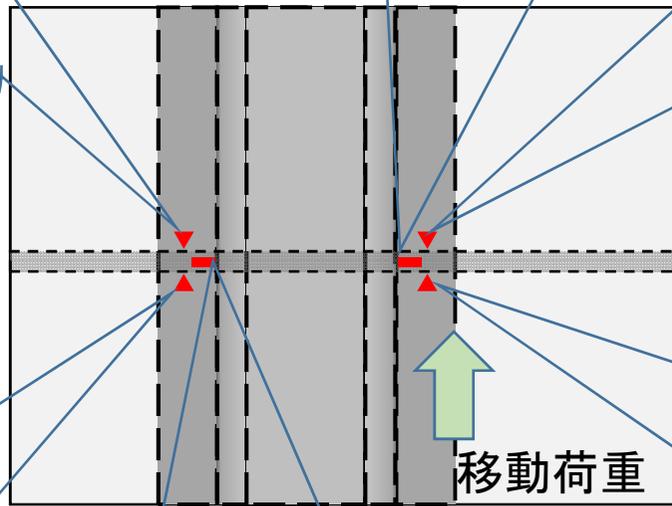
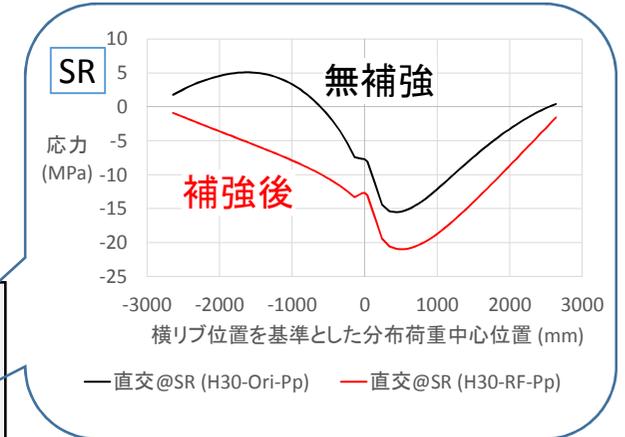
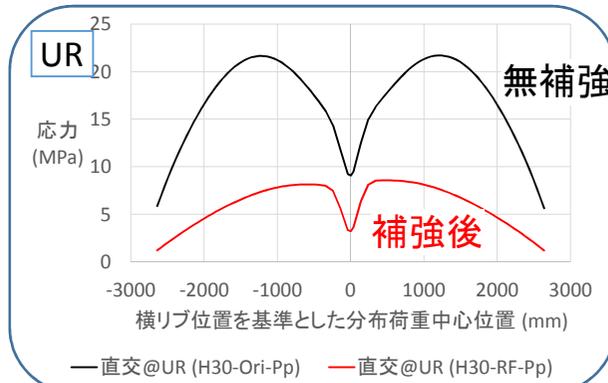
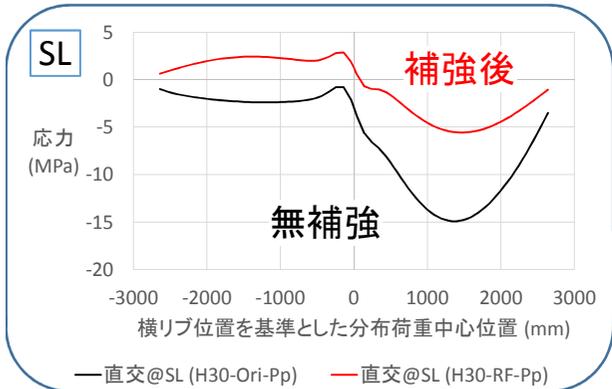
平面図

横桁 間隔	28@2.764 ³ = 77.400	28@2.857 ¹ = 80.000	28@2.857 ¹ = 80.000	32@2.656 ³ = 85.000	36@2.736 ¹ = 98.500	36@2.736 ¹ = 98.500	32@2.656 ³ = 85.000	28@2.964 ³ = 83.000
き裂数		n=89	n=153	n=69	n=47	n=3	n=3	n=5

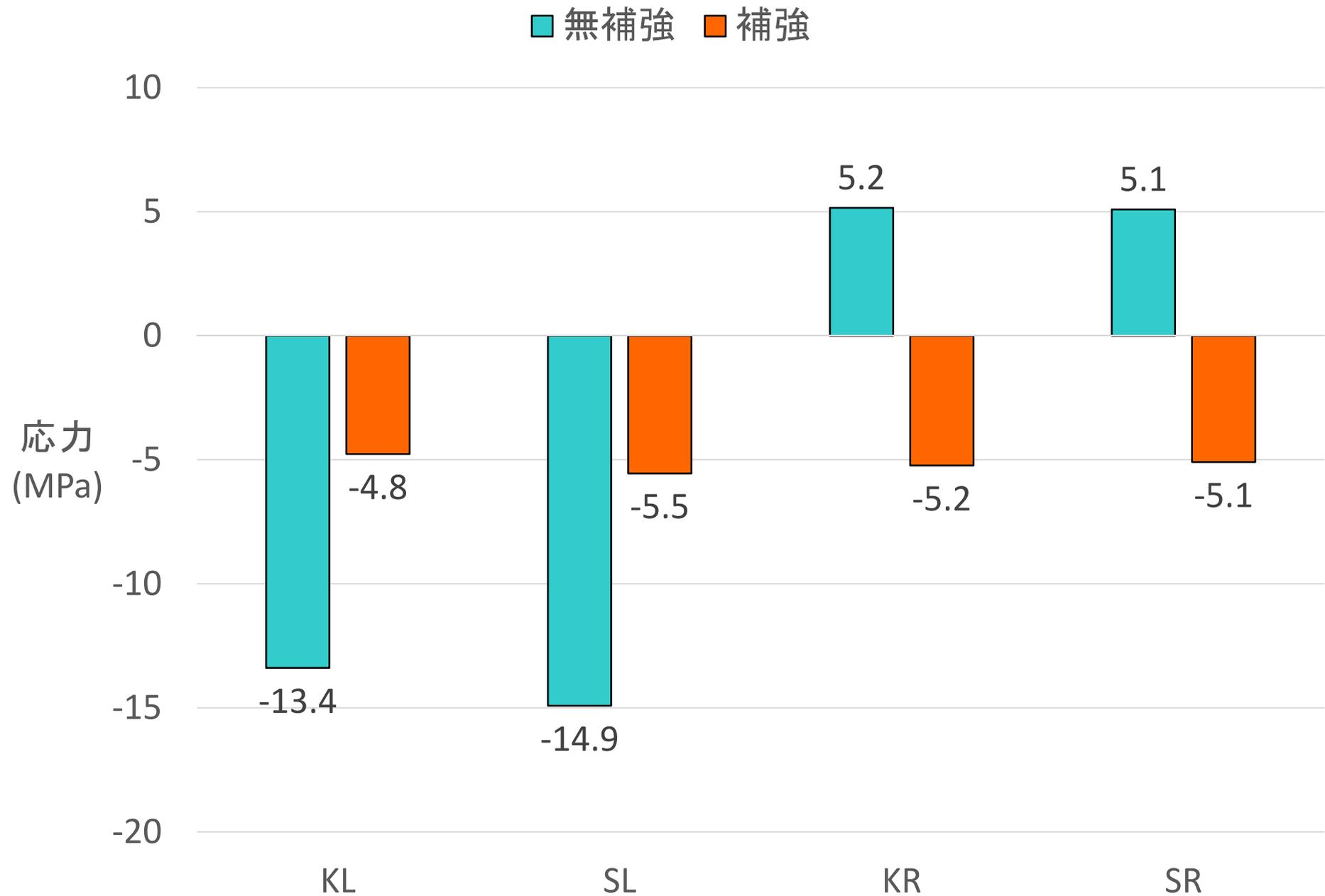
横リブ間隔 × き裂数



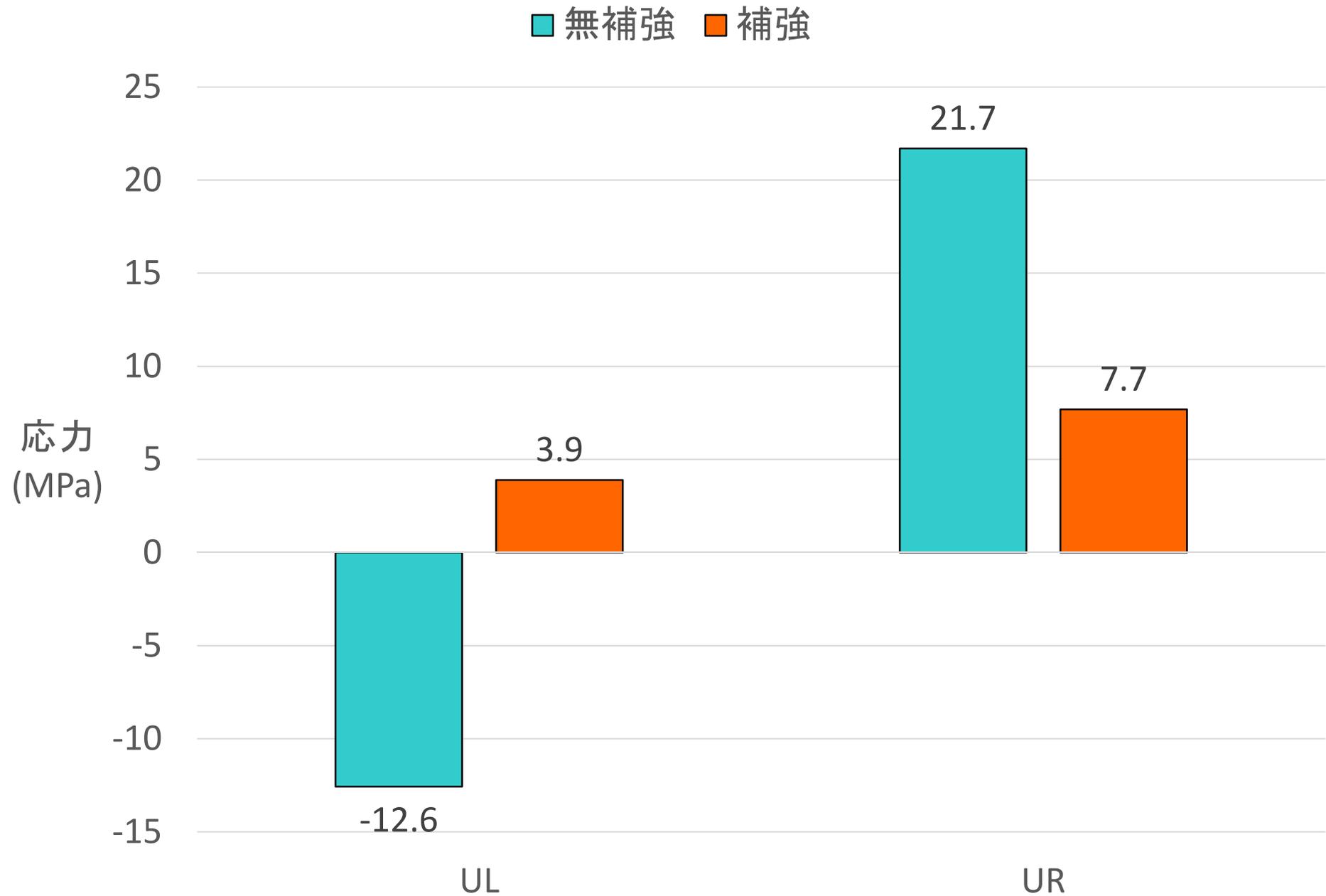
補強効果 - 溶接線直交方向応力による比較



溶接線直交方向ピーク応力の変化：横リブ



溶接線直交方向ピーク応力の変化：Uリブ



解析結果まとめ

- アンクル補強は着目する溶接部の応力(最大主応力, および, 溶接線直交方向応力)を低減する効果があり, 疲労強度向上に効果がある.
 - 載荷点直下の横リブ側止端部では, 溶接線直交方向の応力が引張から圧縮に変化する.
 - Uリブ側の溶接止端部や非載荷側の横リブ止端部では, 発生応力範囲が補強前の1/2から1/3に低減される.
- 着目溶接部に作用する引張応力度は, 横リブに対するUリブ下面の水平移動により引き起こされる.
 - アンクル補強を施すことにより, Uリブ下面の水平方向の移動を抑えることができる
 - Uリブ側止端部はUリブ下面の橋軸直角方向の移動が影響
 - 横リブ側止端部はUリブ下面の橋軸方向の移動が影響

③疲労実験

(1枚Uリブタイプ)

はじめに

RC床版橋では、垂直補剛材上端部に対する支圧接合型のワンサイドボルト（TRS）を用いた交通規制が不要な下面からの疲労対策効果について実験的に確認されており、すでに実橋にも適用されている。



RC床版橋の垂直補剛材上端部
に対する補強工法

しかしながら、鋼床版橋の垂直補剛材上端部についてはTRSを用いた疲労対策を試みられた事例はない。

参考文献) 坂本、坂野、小西、小山：対傾構取付け垂直補剛材上端部の疲労対策に関する実験的検討、鋼構造論文集、第25巻、第100号、pp.1～14、2018.

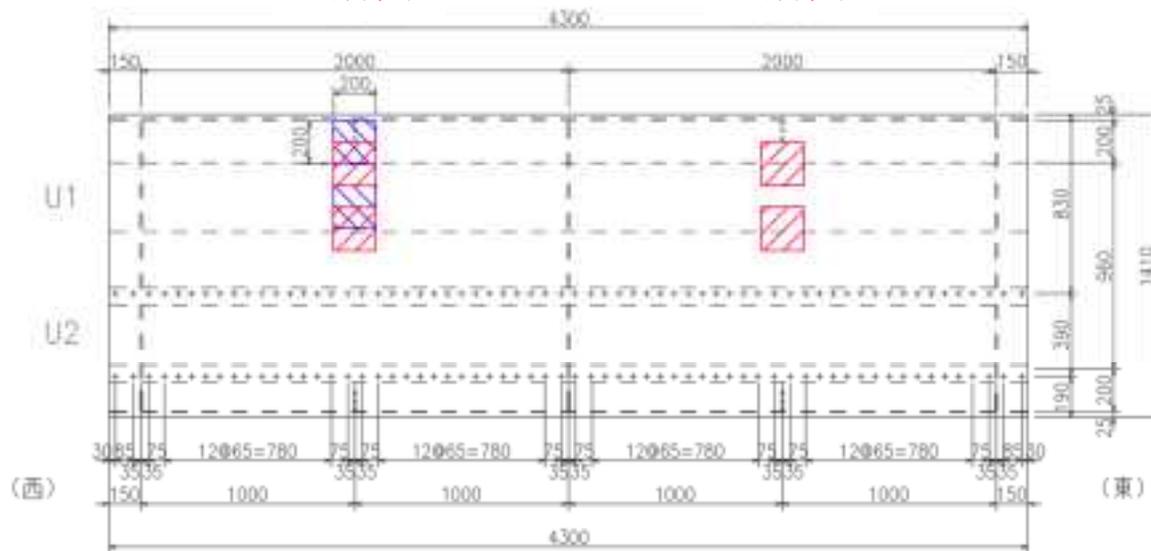
はじめに

鋼床版橋の垂直補剛材上端部の疲労損傷に着目し、
TRSを用いた補強工法を適用して、
補強前後の応力分布と疲労寿命を比較することによって
補強工法の効果を検証することを目的とする。

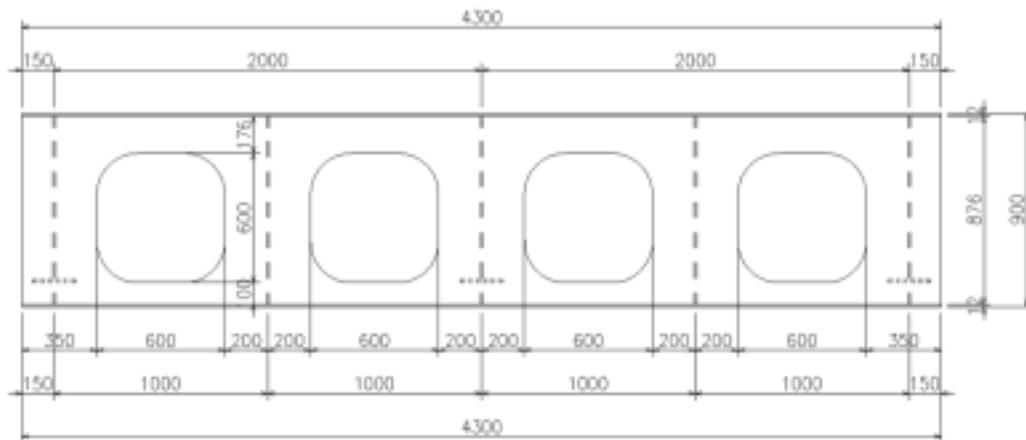
載荷位置

A断面

C断面

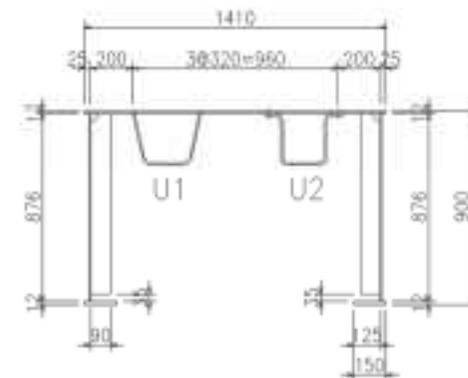


(1) 平面図

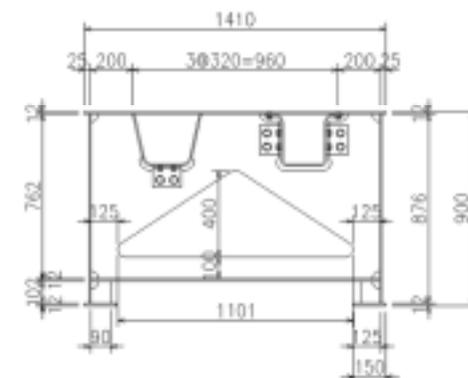


(2) 側面図

載荷位置 (単位: mm)



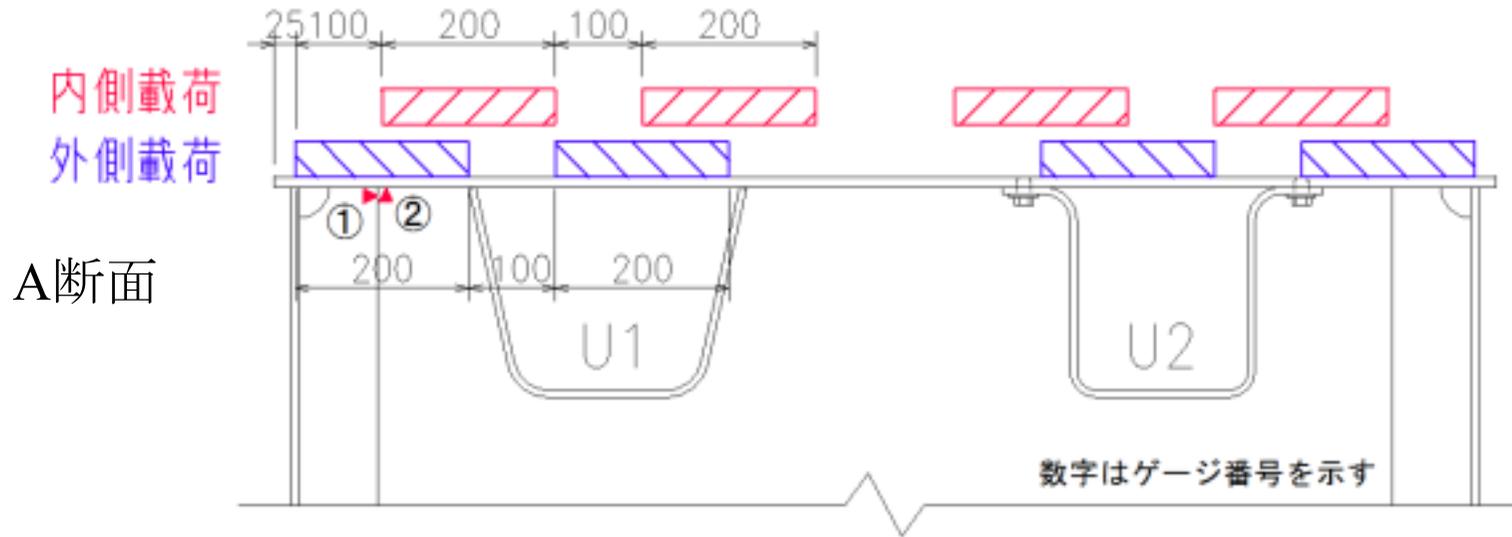
(3) 断面図 (支脚部)



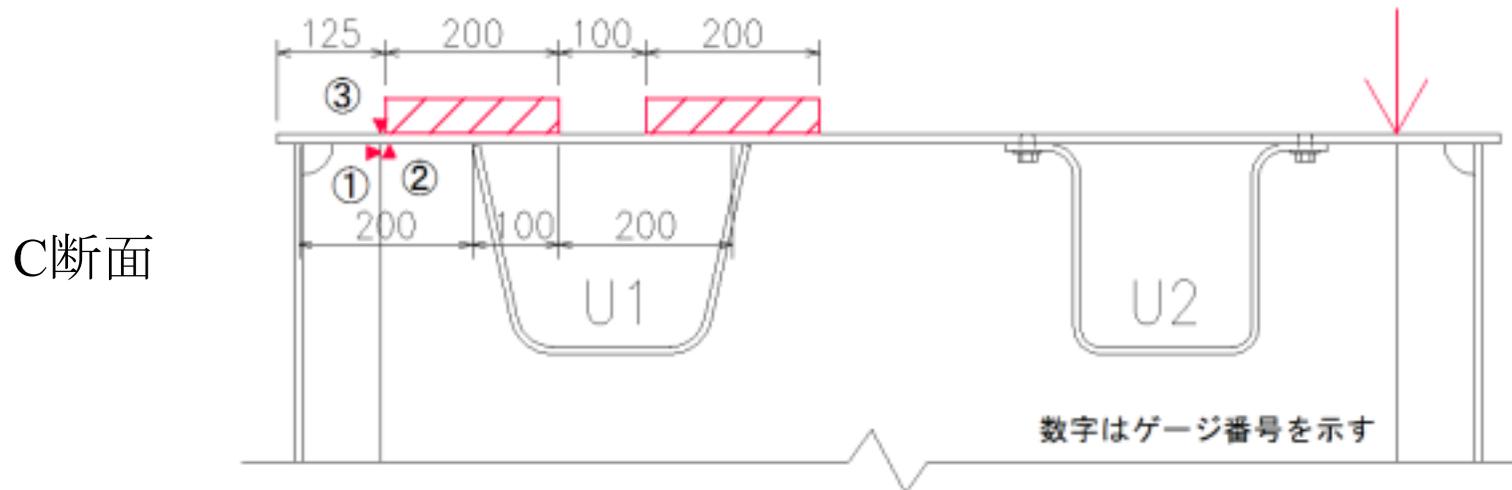
(4) 断面図 (横リブ交差部)

* 端横筋のみ切欠き

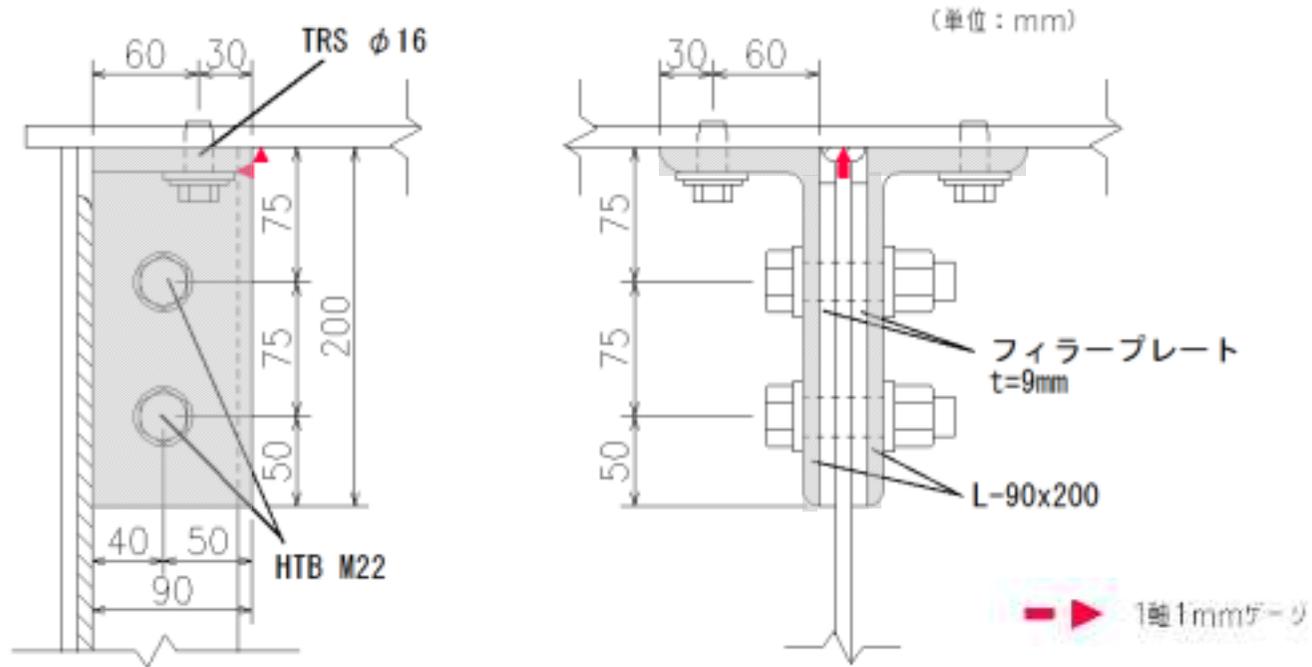
載荷位置



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床版橋で採用されたものを準用した。

載荷状況



試験体全景



載荷梁（内側載荷）



載荷梁（外側載荷）

疲労試験ステップ

<A断面>

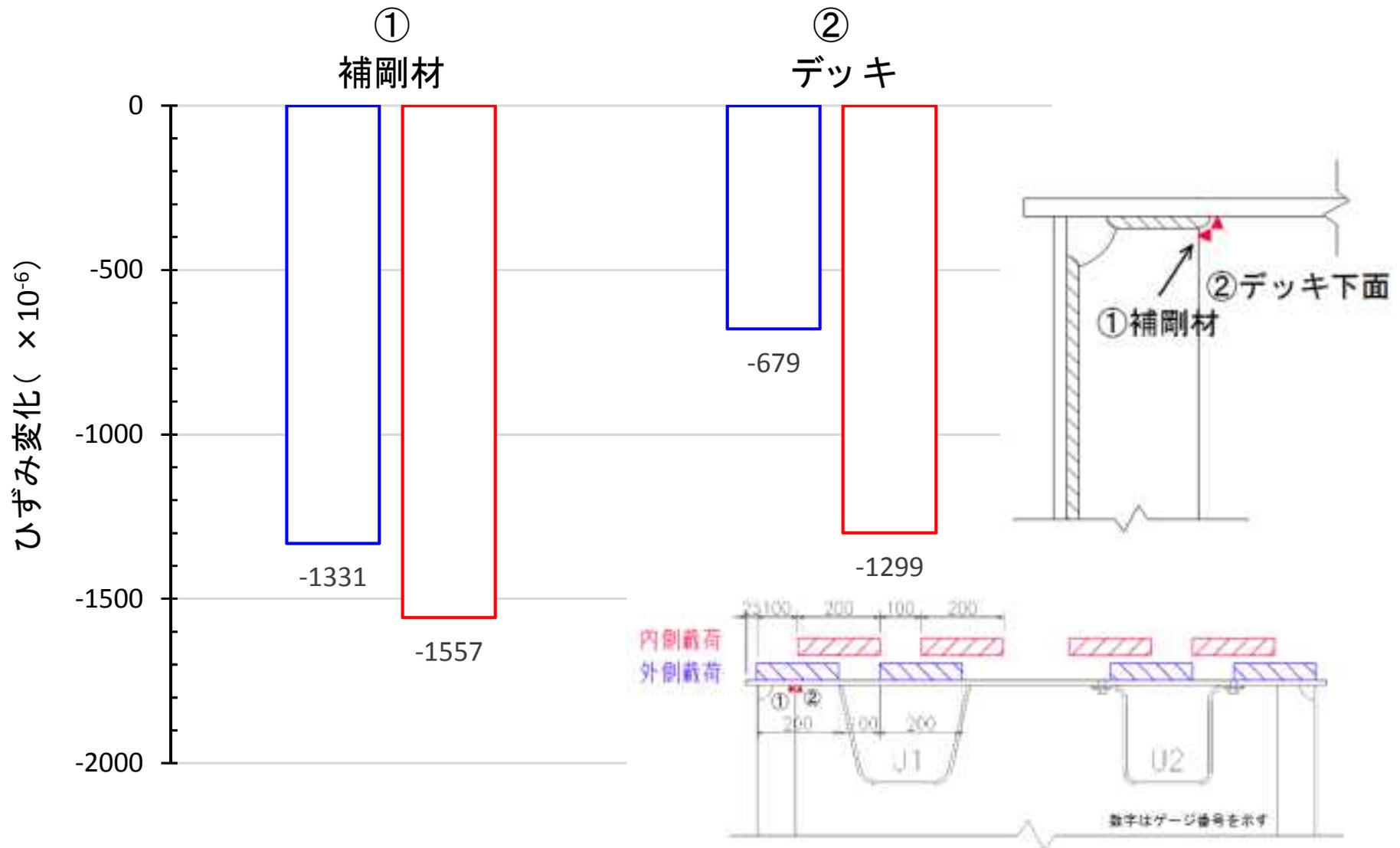
ステップ	目的	対策
1	き裂再現	—
2	事後保全対策効果の検証	き裂削除+当て板補強

<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	—
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

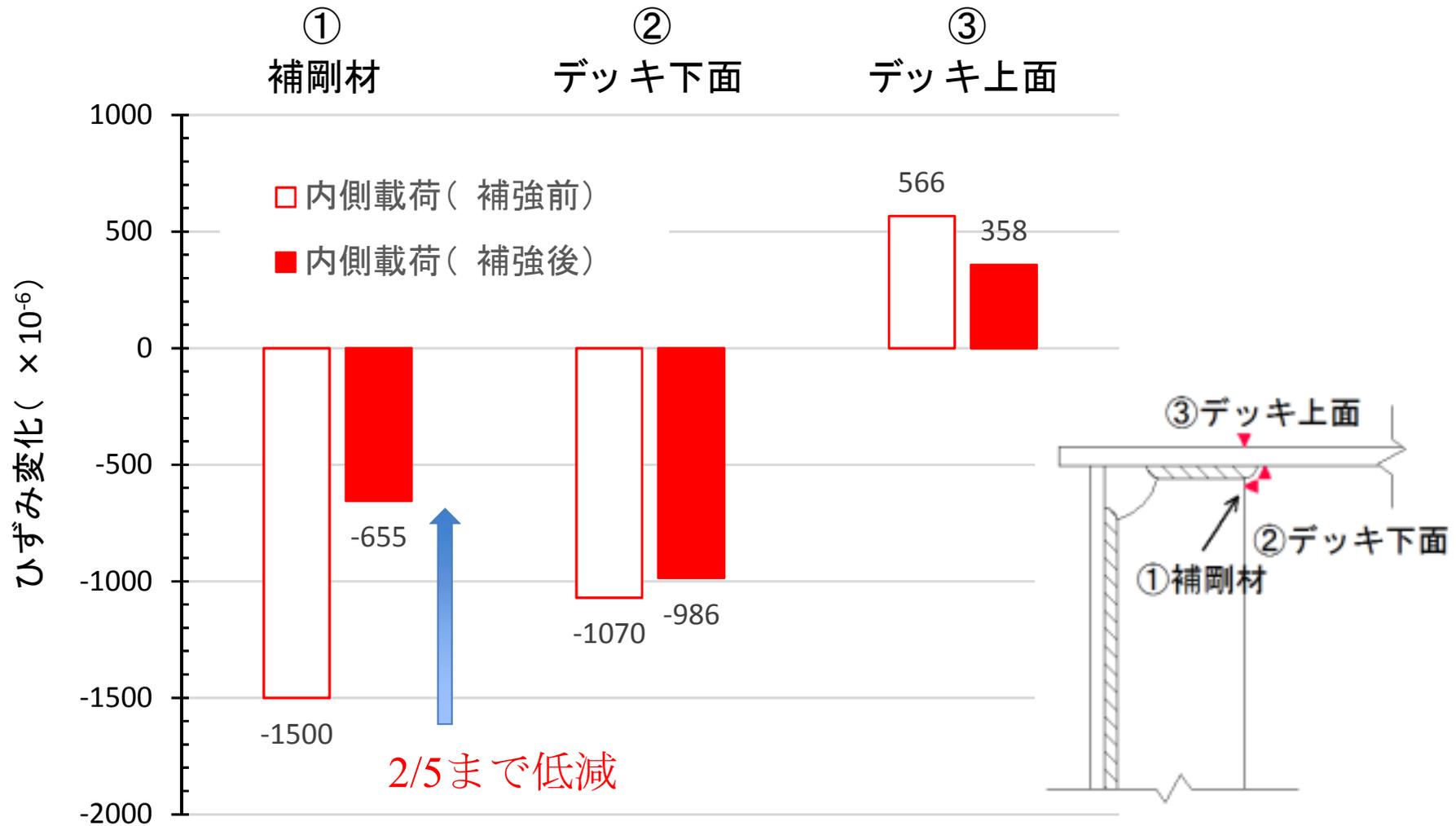
靜的載荷試驗結果

静的載荷試験結果 (A断面)



外側載荷より内側載荷の方がひずみ変化が大きい
→内側載荷で疲労試験を行う

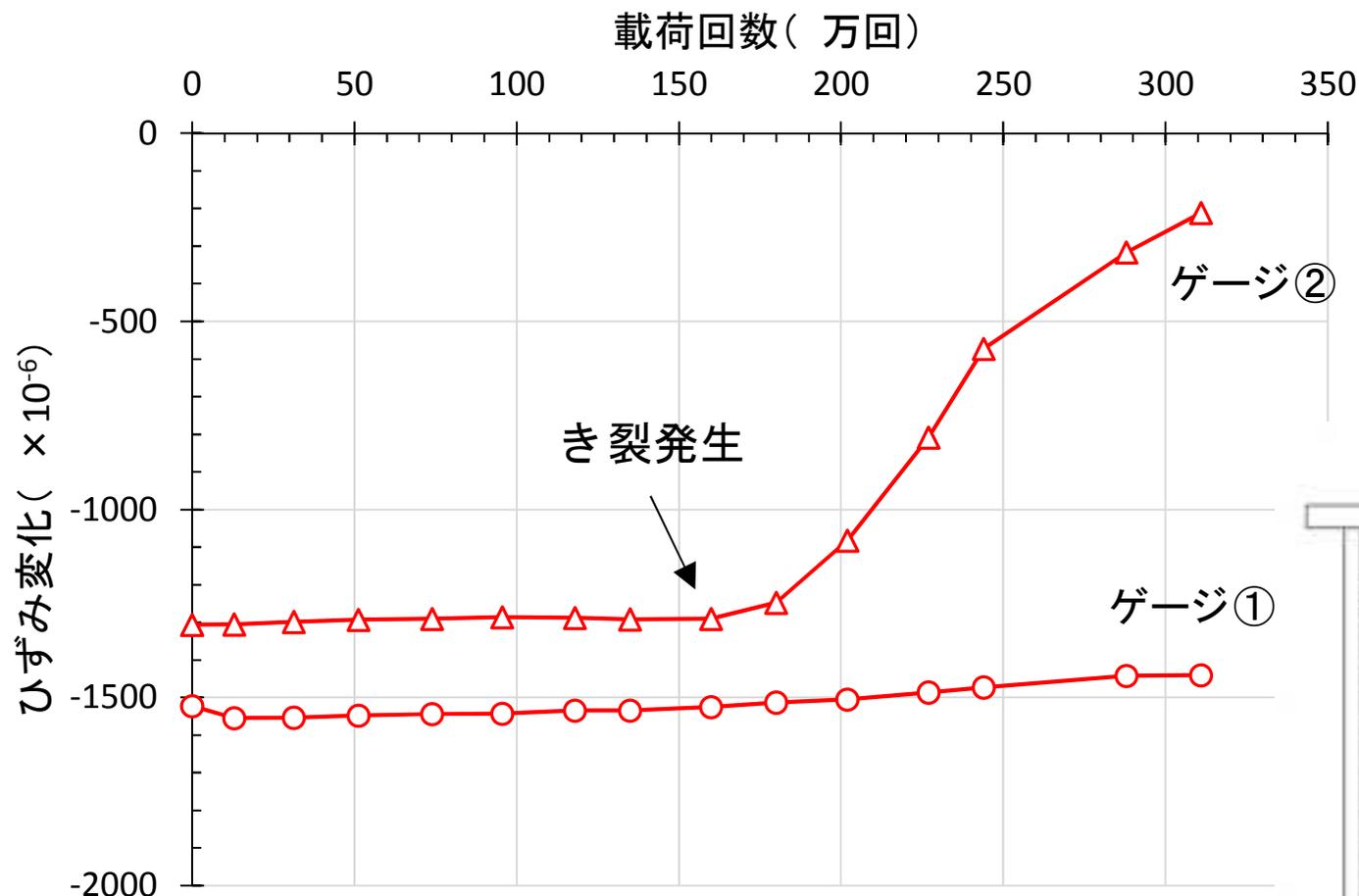
静的載荷試験結果 (C断面)



補強を施すことで、補剛材コバ面の応力が2/5程度まで低減

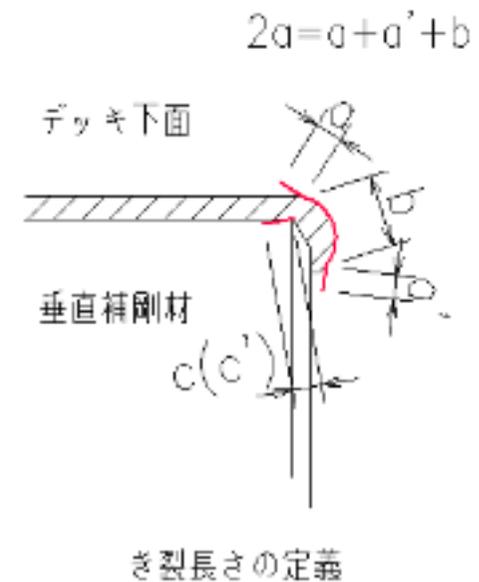
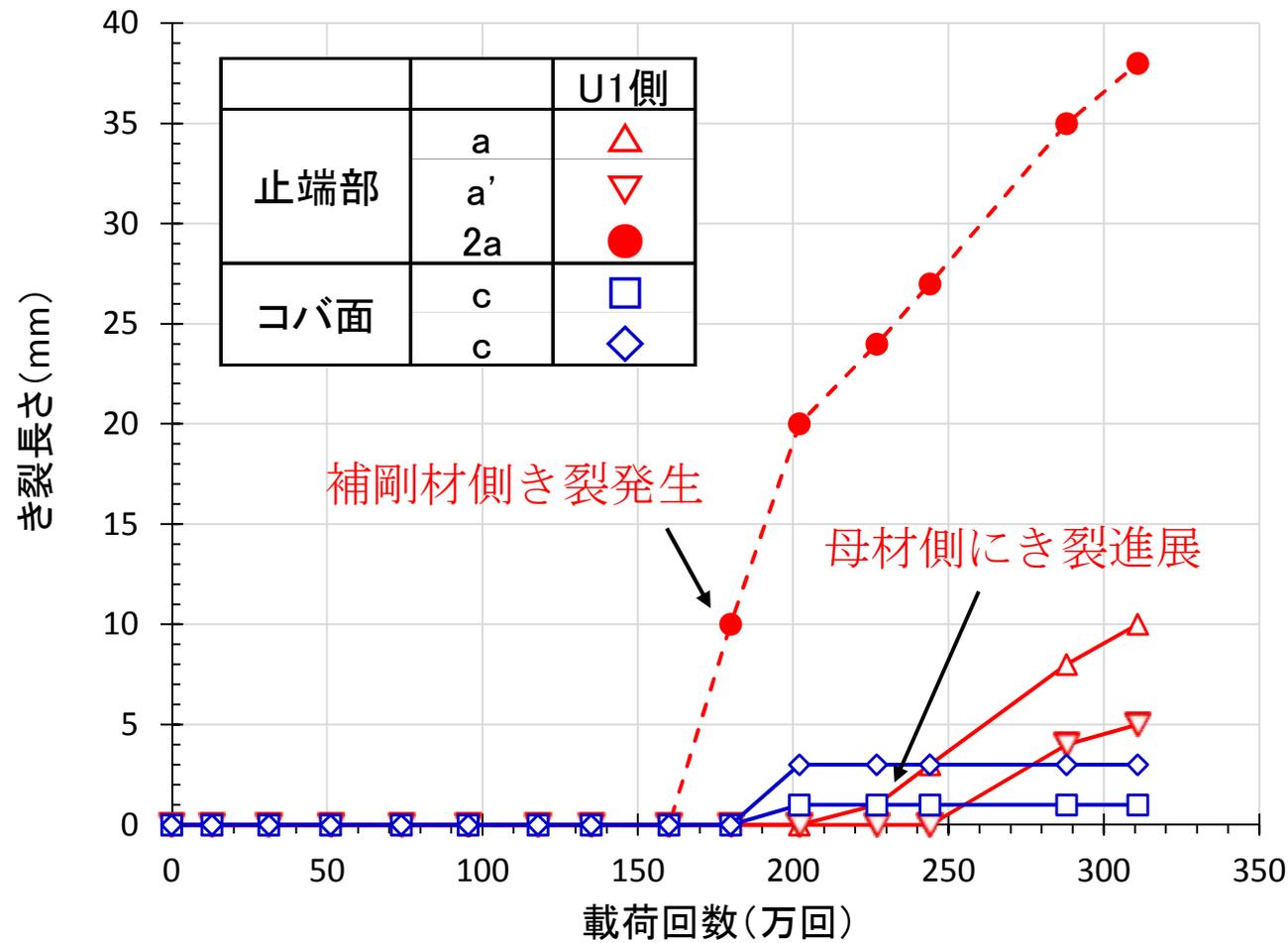
疲労試験結果 (*A*断面)

き裂再現



160万回以降でひずみ変化が急激に減少
→き裂が発生したものと推定

き裂長さ

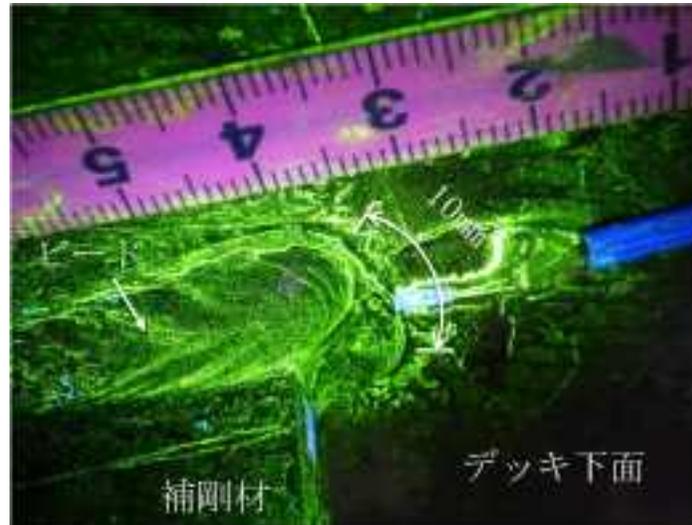


180万回でデッキ側と補剛材側の溶接止端部にき裂を確認
 227万回でデッキ側の止端部から母材部に亀裂進展
 デッキ母材に38mm程度き裂が進展したところで試験を終了

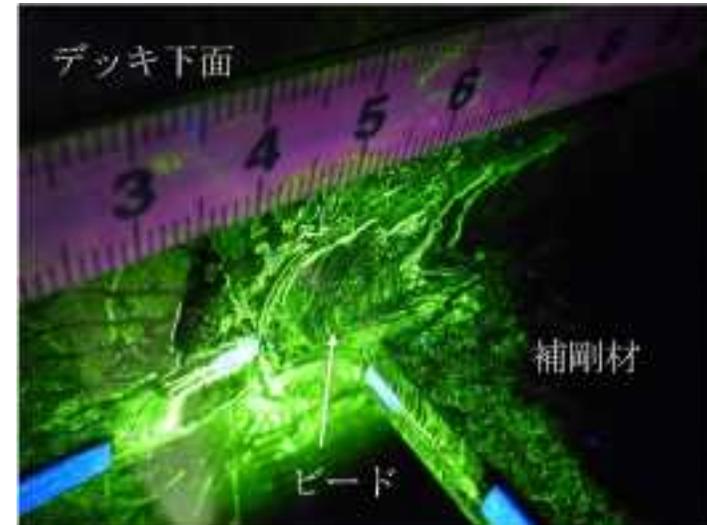
き裂再現（き裂発生状況）

N=180万回

き裂確認時



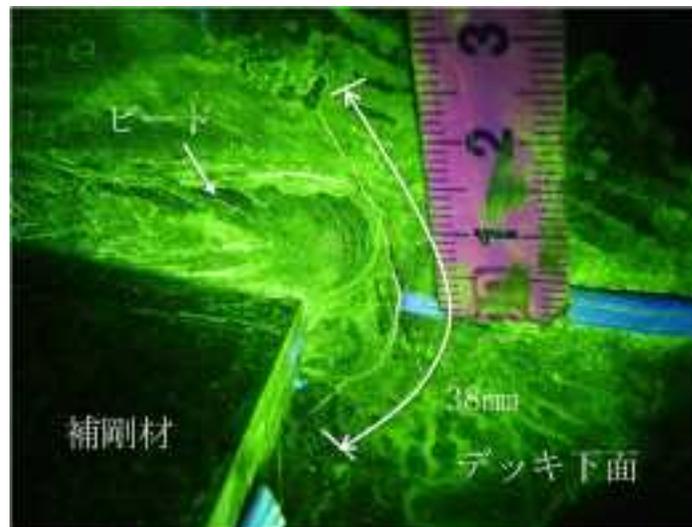
西面



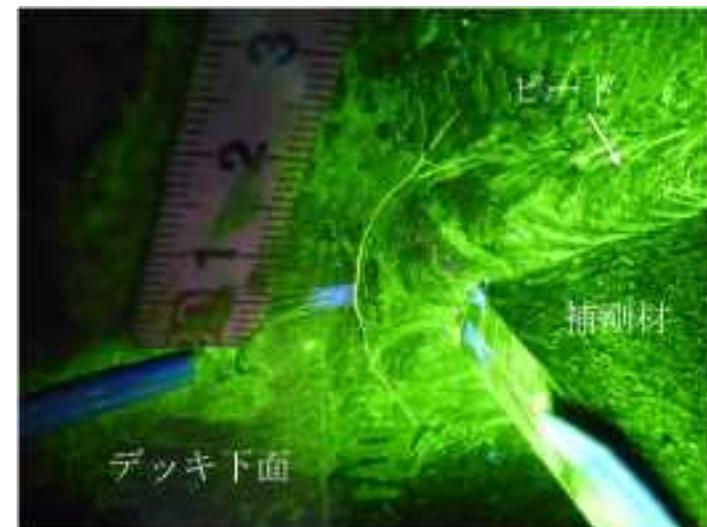
東面

N=311万回

き裂再現試験
(ステップ1)
終了時



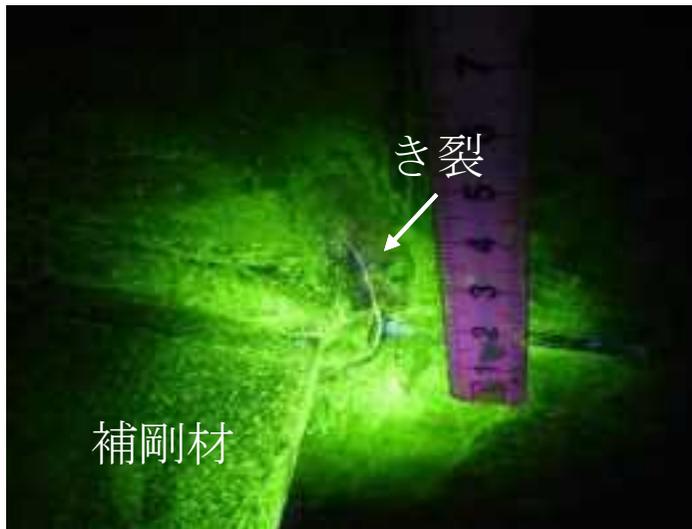
西面



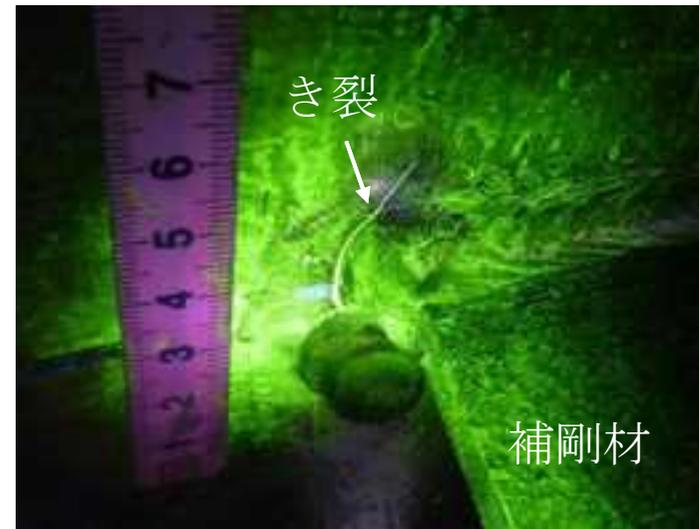
東面

き裂再現終了→補強を施し事後保全対策効果の検証を行う。

事後保全対策1 (切削中、その1)



西面



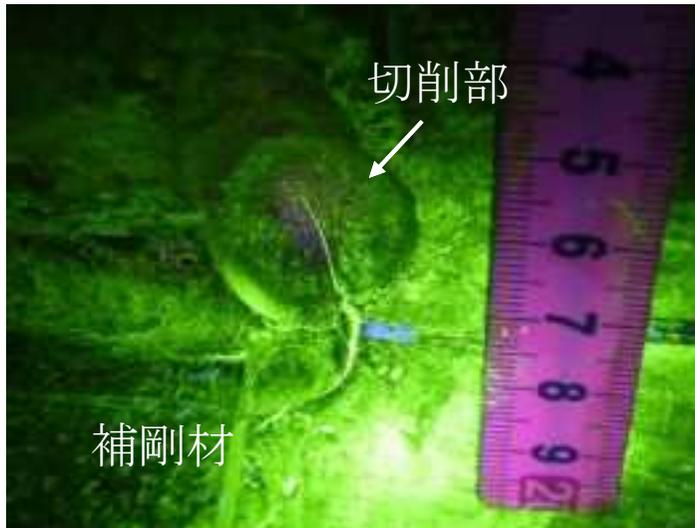
東面



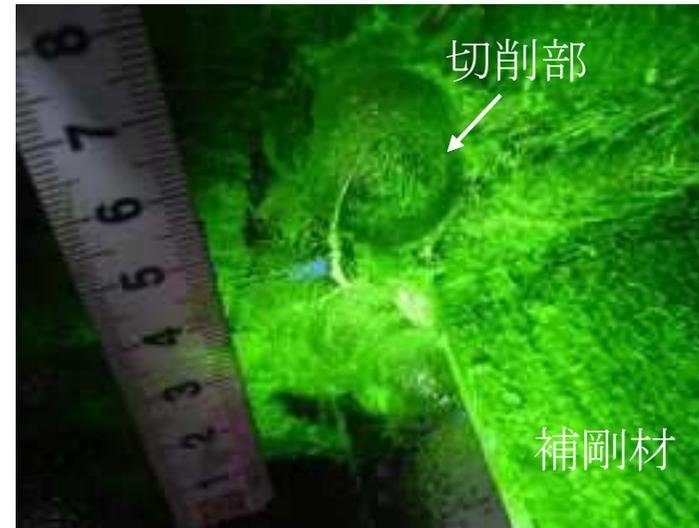
バーグラインダー

＜事後保全対策＞
き裂をバーグラインダーを用いて削除し、TRSを用いた当て板補強を施す。

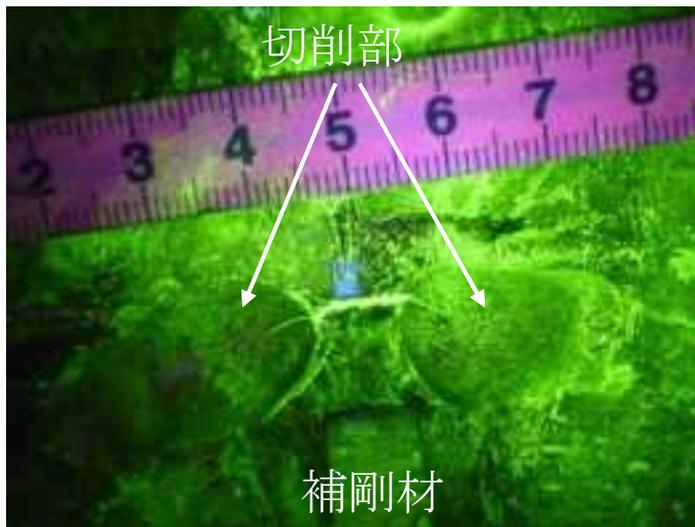
事後保全対策1 (切削中、その2)



西面

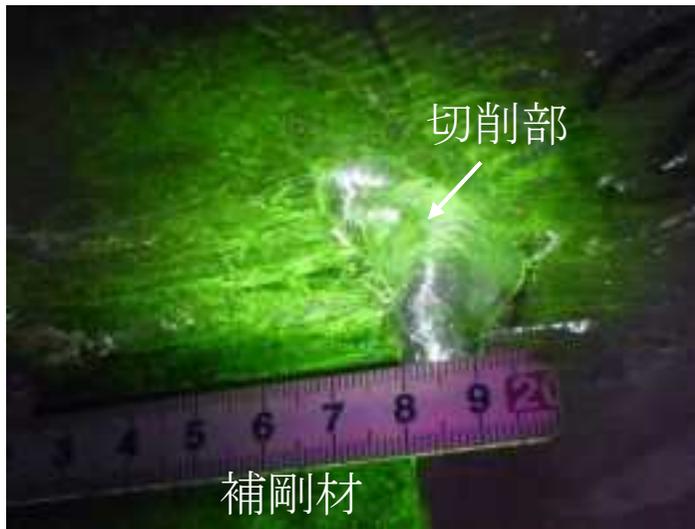


東面



上端部

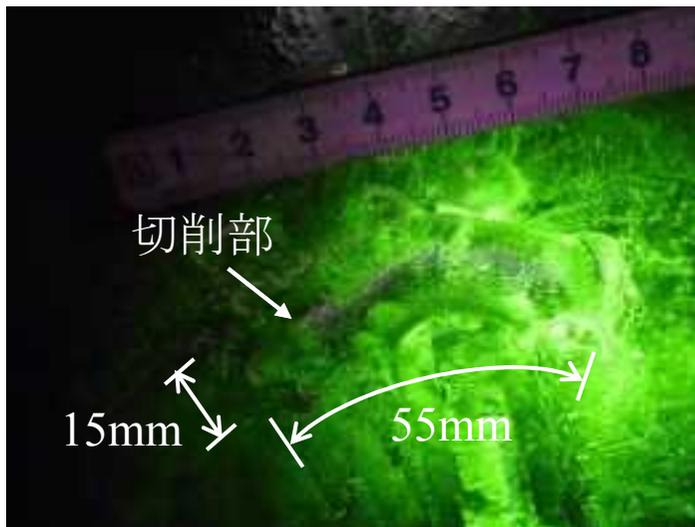
事後保全対策1 (切削後)



西面



東面



上端部

<最終切削長さ>

- 長さ : 55mm
- 幅 : 15mm
- 深さ : 8mm

事後保全対策1（当て板取り付け）



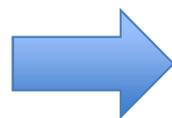
当て板側面



当て板断面



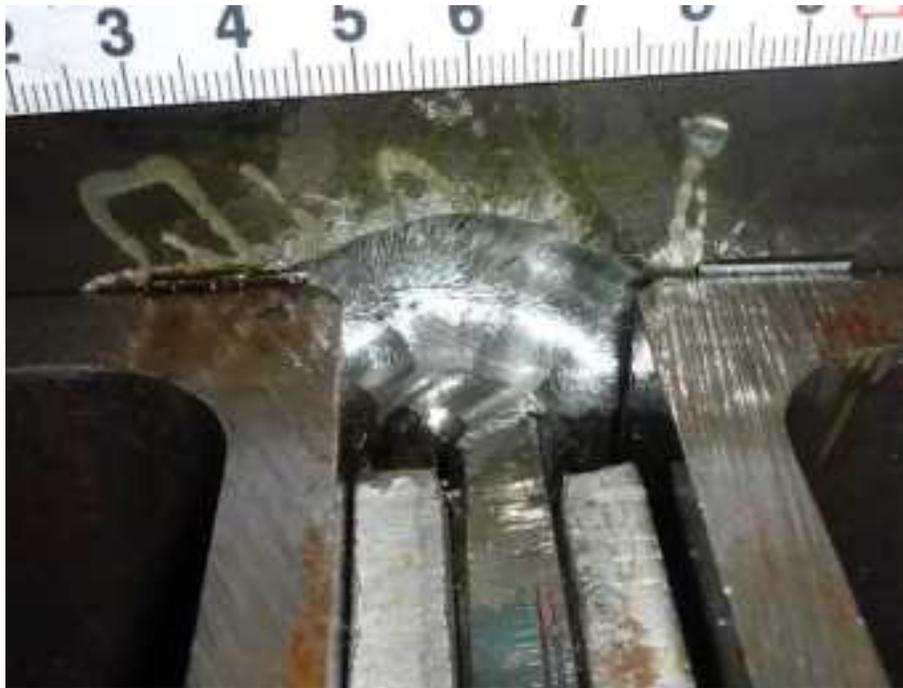
切削部拡大（当て板無し）



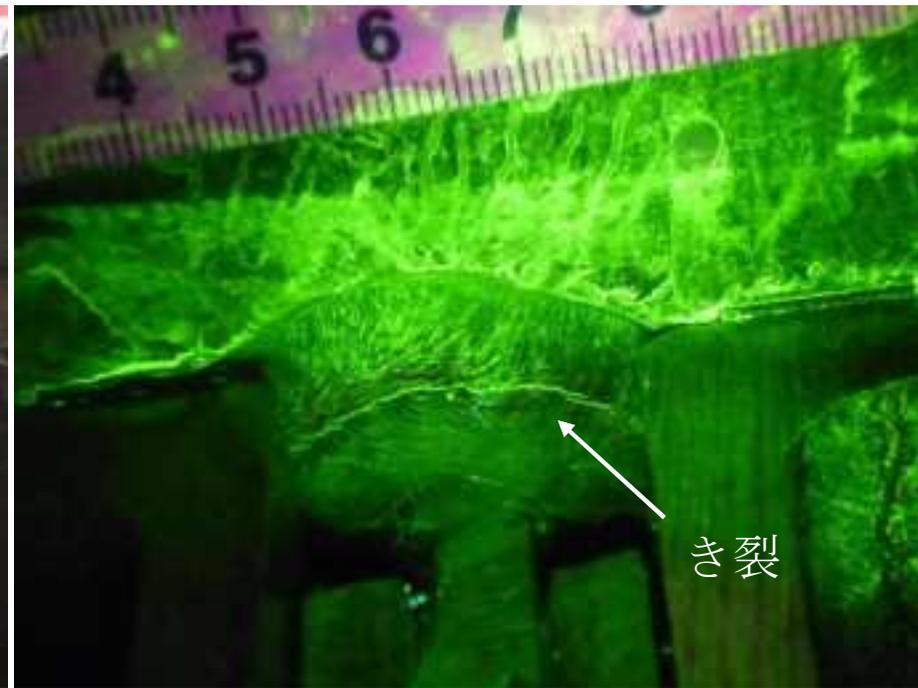
切削部拡大（当て板あり）

切削部がアンクル材からはみ出しており、アンクル材を伸ばす必要がある。 73

事後保全対策1 (き裂発生) $N=464(153)$ 万回時



U1デッキ下面



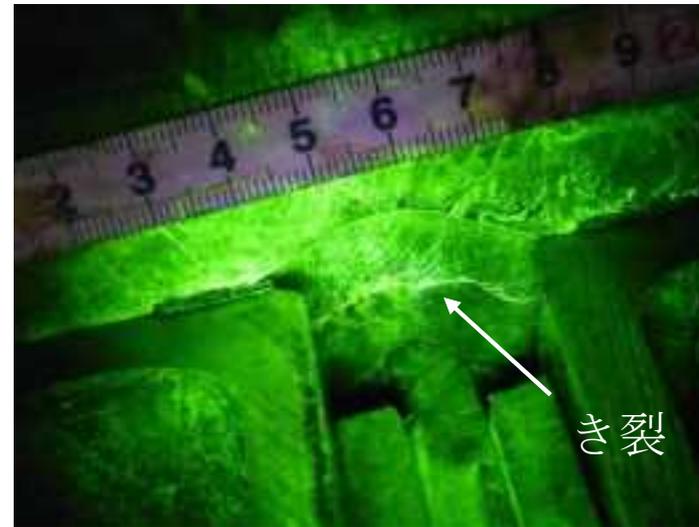
U1デッキ下面(MT)

補強後150万回程度载荷した時点で、き裂が再発

事後保全対策1 (疲労試験終了) $N=578(207)$ 万回



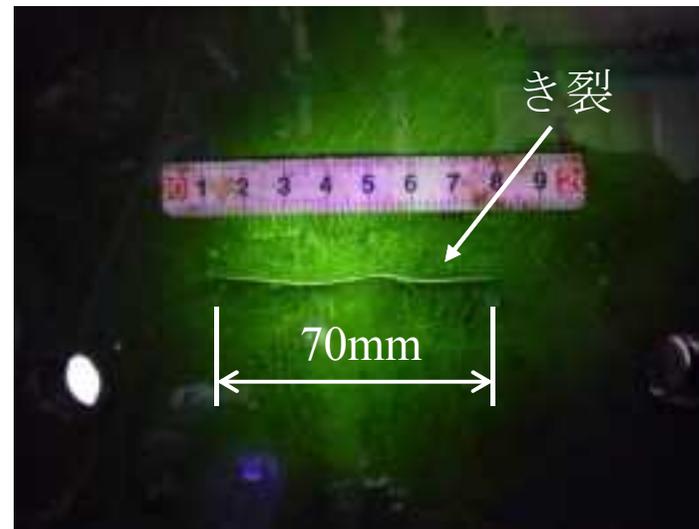
デッキ下面



デッキ下面(MT)



デッキ上面(PT)

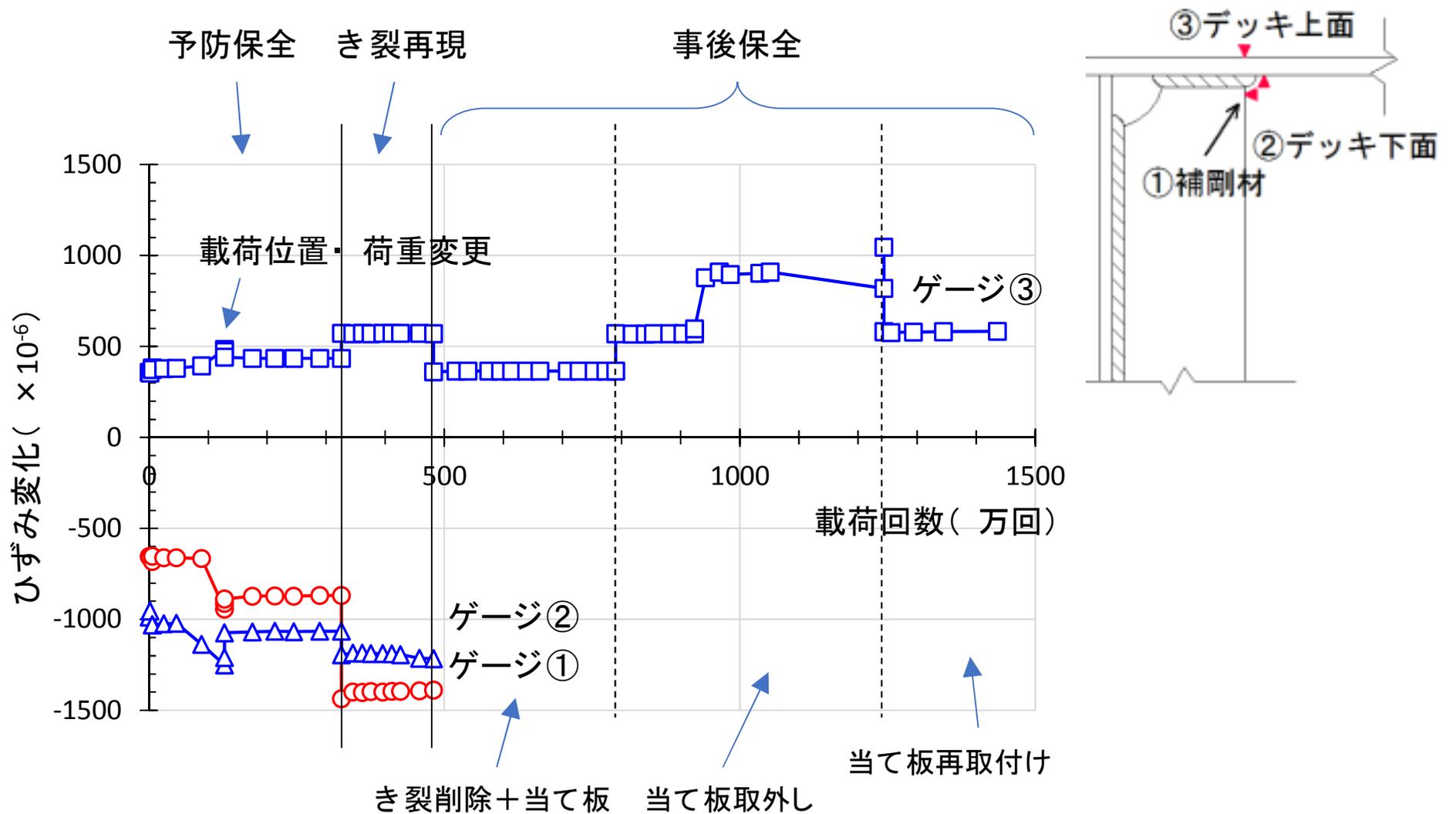


デッキ上面(MT)

削り込みによる削除部を覆うような大きさのアンクル材が必要

疲労試験結果 (C断面)

ひずみ変化

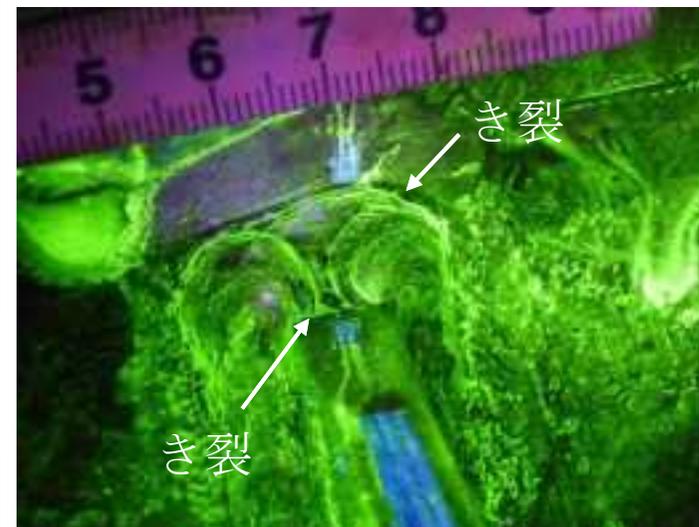
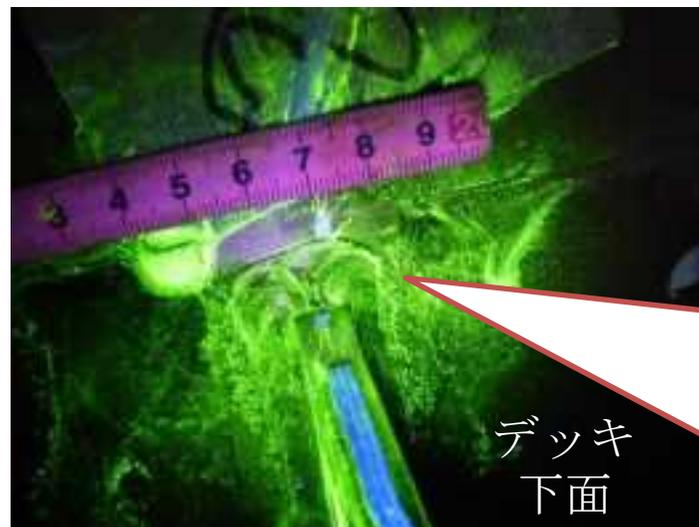


対策を施さない場合、130万回程度の繰り返し载荷でき裂発生

き裂再現 (き裂発生状況)

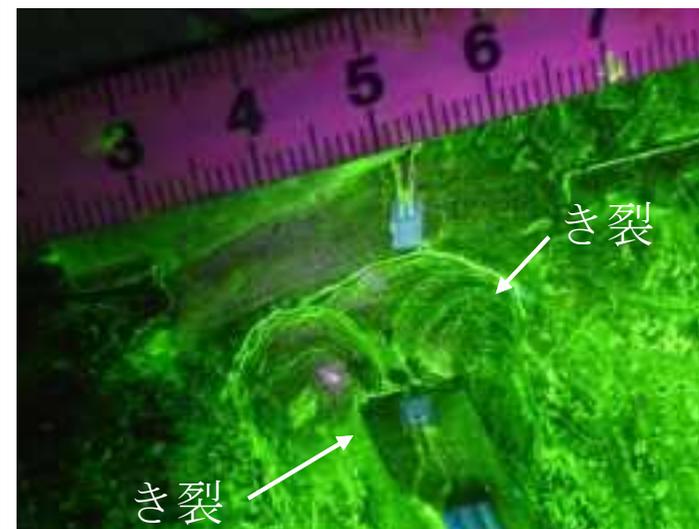
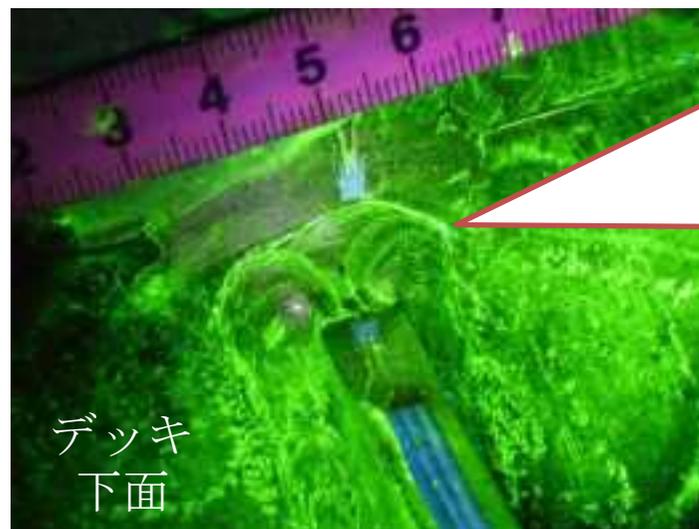
N=460万回

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

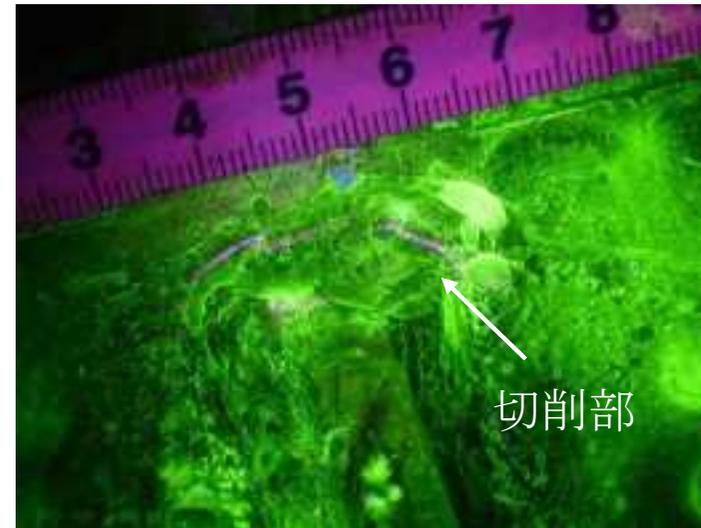
き裂再現→事後保全対策2（切削後） $N=482$ 万回

<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



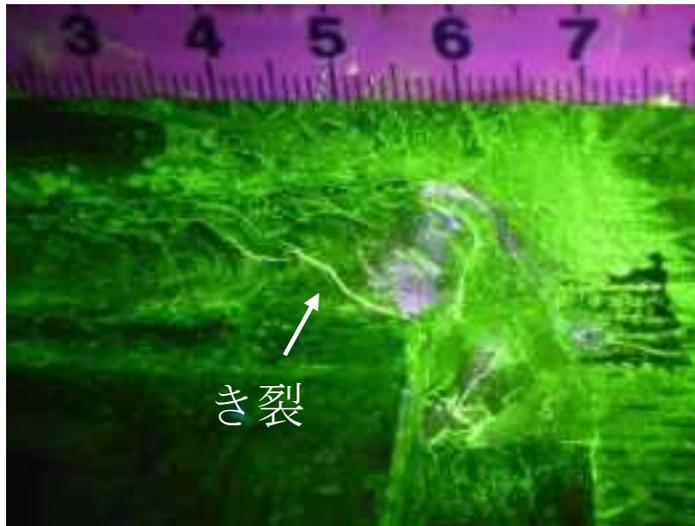
当て板取り外し後



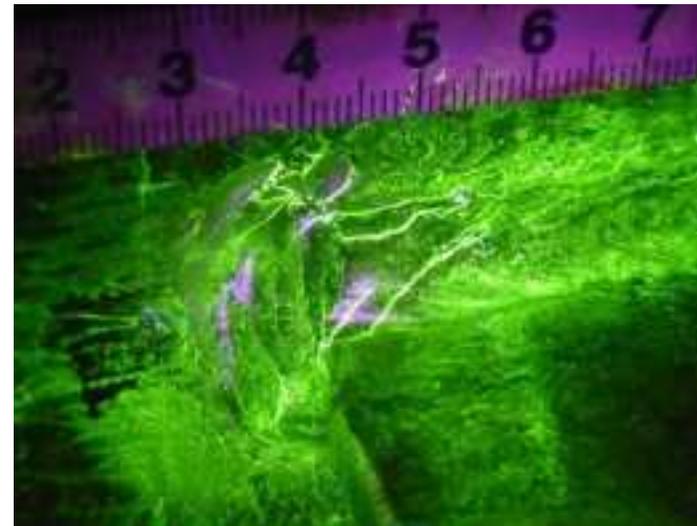
当て板取り外し後MT

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。

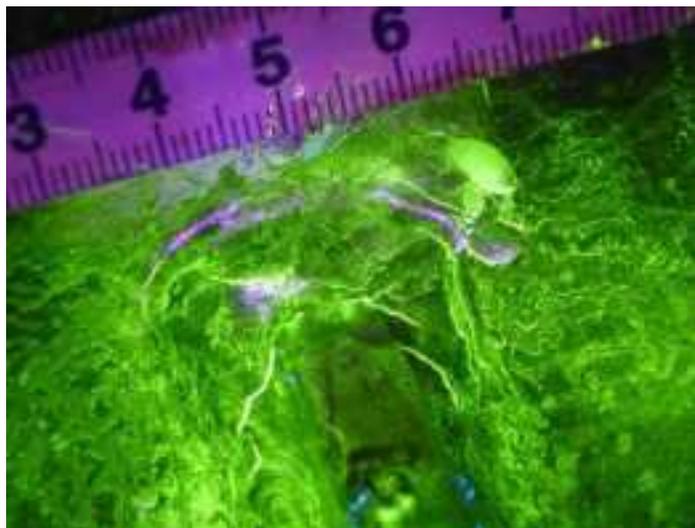
事後保全3 (き裂発生) $N=984$ (194) 万回時



U1西面



U1東面



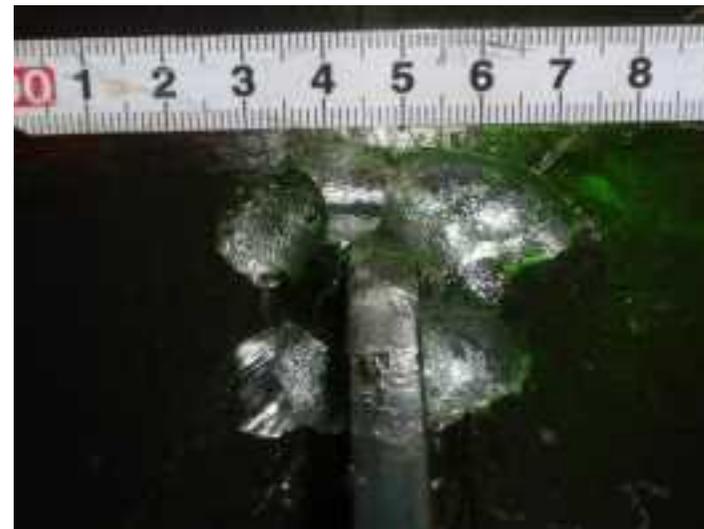
U1上端部

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



まとめ

<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1/3～2/5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

- 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クル材が必要**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クル材により、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**。

今年度の研究方針

【令和元年度】

①FEM解析による

新設および更新用鋼床版構造の検討

②疲労実験による

垂直補剛材上端部の疲労対策の効果の検証

新設および更新用鋼床版構造の疲労耐久性の検証

③実橋での疲労対策および新設あるいは更新用鋼床版構造の適用と応力計測による疲労耐久性の検証