

疲労損傷に対する原因究明 及び補修補強の考え方

森 猛（法政大学）

疲労損傷の原因究明と補修補強の考え方

法政大学 森 猛



本日の話題

1. 疲労の基本

2. 鋼道路橋の疲労損傷事例とその原因究明

桁形式橋、閉断面リブ鋼床版

作用応力範囲と疲労強度

3. 疲労損傷対策とその考え方

予防保全

補修・補強

4. 補修・補強部の疲労耐久性評価

垂直補剛材上端と鋼床版デッキプレートすみ肉溶接継手

1. 疲労の基本

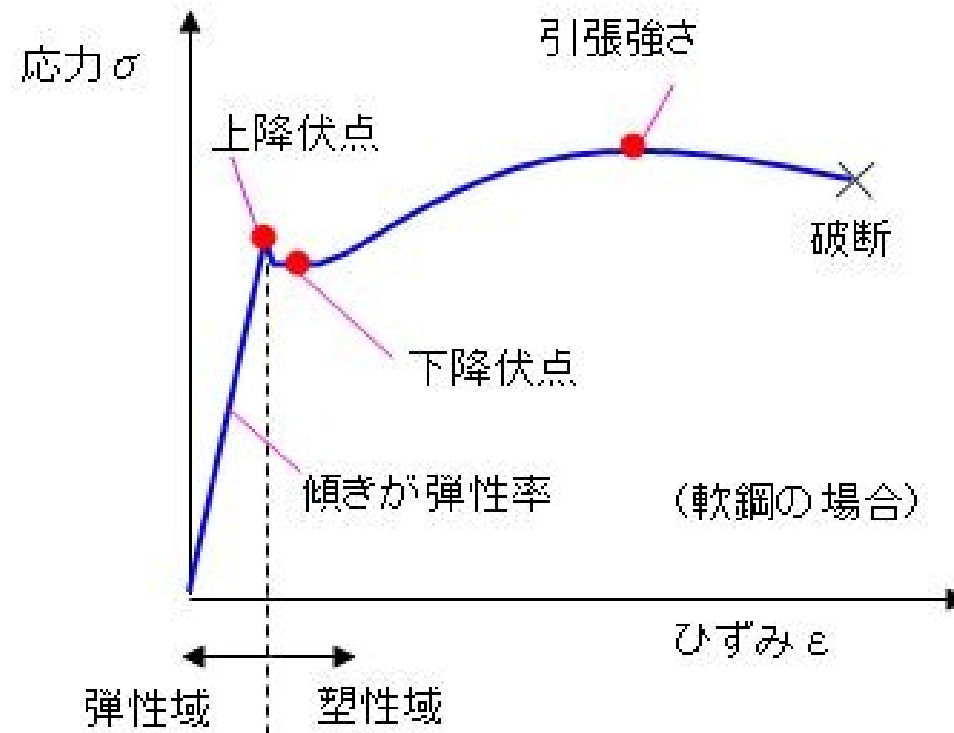
鋼材の破壊

延性破壊

脆性破壊

疲労破壊

応力腐食割れ(遅れ破壊)



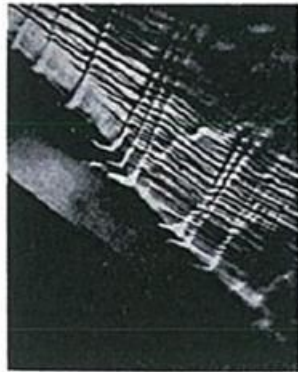
疲労

1回の作用では問題のない応力レベルであっても、繰り返し作用することにより、微小なき裂が発生して、それが進展し破断に至る現象

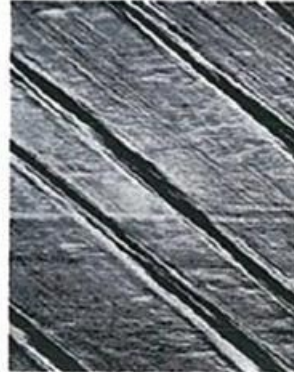
疲労のメカニズム

すべり変形

単調引張



疲労

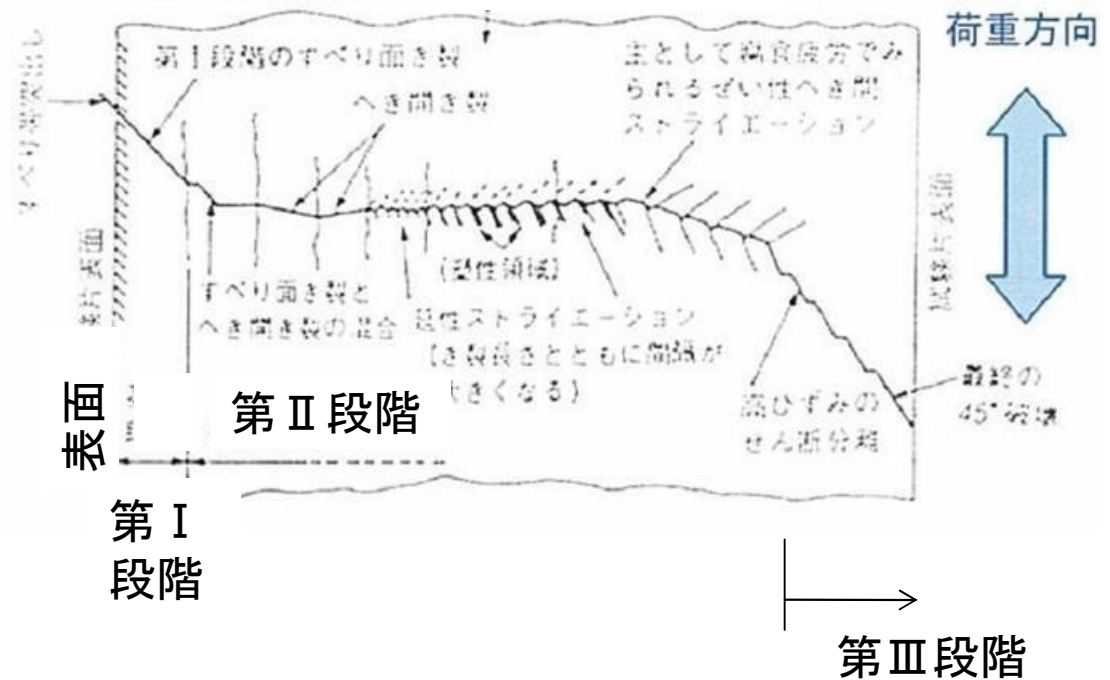


荷重方向

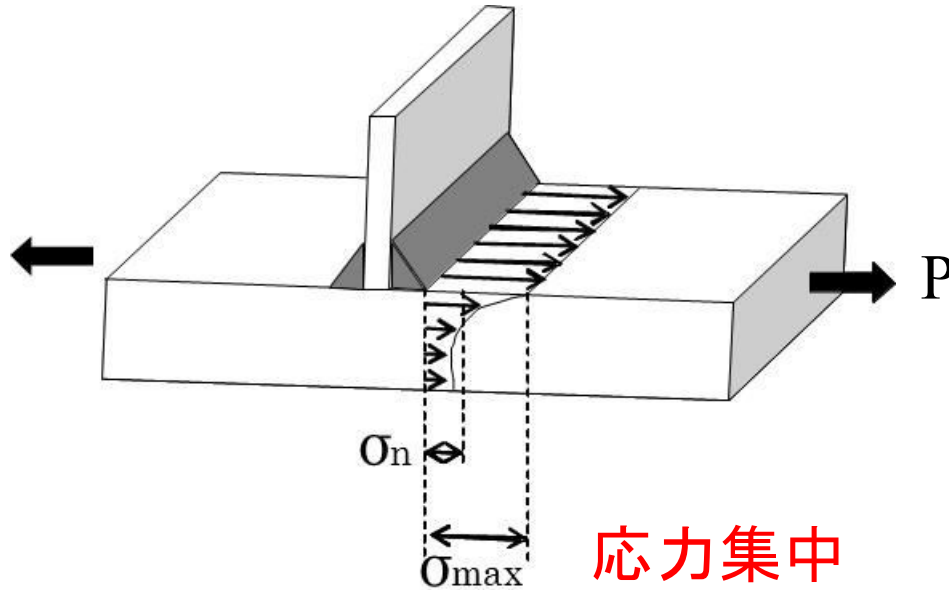
入り込み突き出し

疲労き裂の発生と進展

き裂進展方向



なぜ溶接継手で疲労が問題となるのか



公称応力 σ_n
 $\sigma_n = P / A$

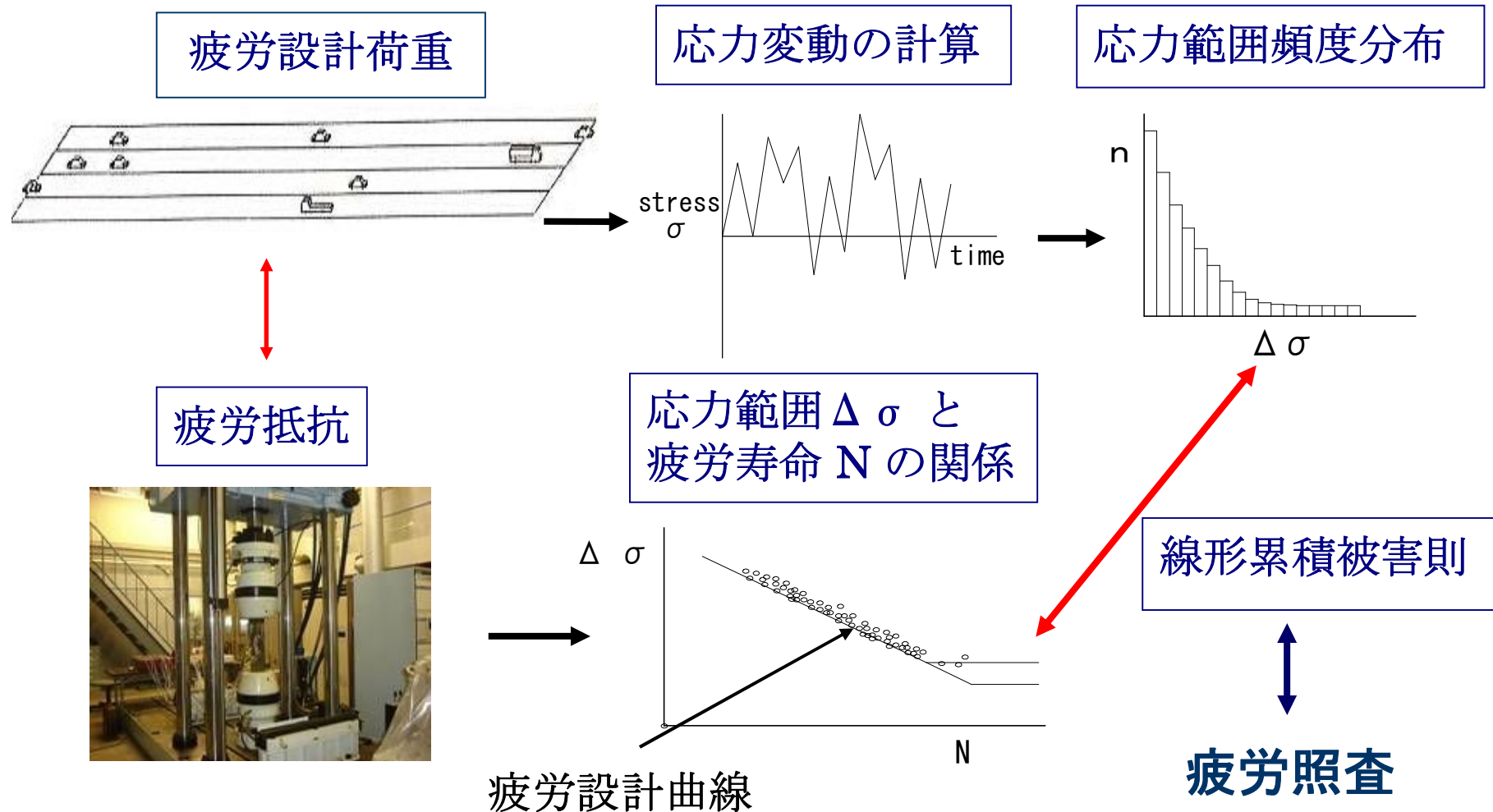
最大応力 $\sigma_{\max}$

応力集中係数 α
 $\alpha = \sigma_{\max} / \sigma_n$

形状不連続
 溶接きず(アンダーカット、ブローホール)
 残留応力

第 I 段階がない or 短い

疲労照査の基本的な流れ・考え方



疲労設計荷重 荷重から応力範囲頻度分布への変換 疲労強度 疲労照査

疲労設計荷重 (鋼道路橋の疲労設計指針)

T荷重

疲労設計荷重の頻度

大型の走行頻度

重量の補正

$$\text{重量} = 200\text{kN} \times \gamma_T \times (1 + i_f)$$

γ_T : 活荷重補正係数 ($= \gamma_{T1} \times \gamma_{T2}$)

γ_{T1} : T荷重補正係数 ($= \log(L) + 1.5, 2.0 \leq \gamma_{T1} \leq 3.0$)

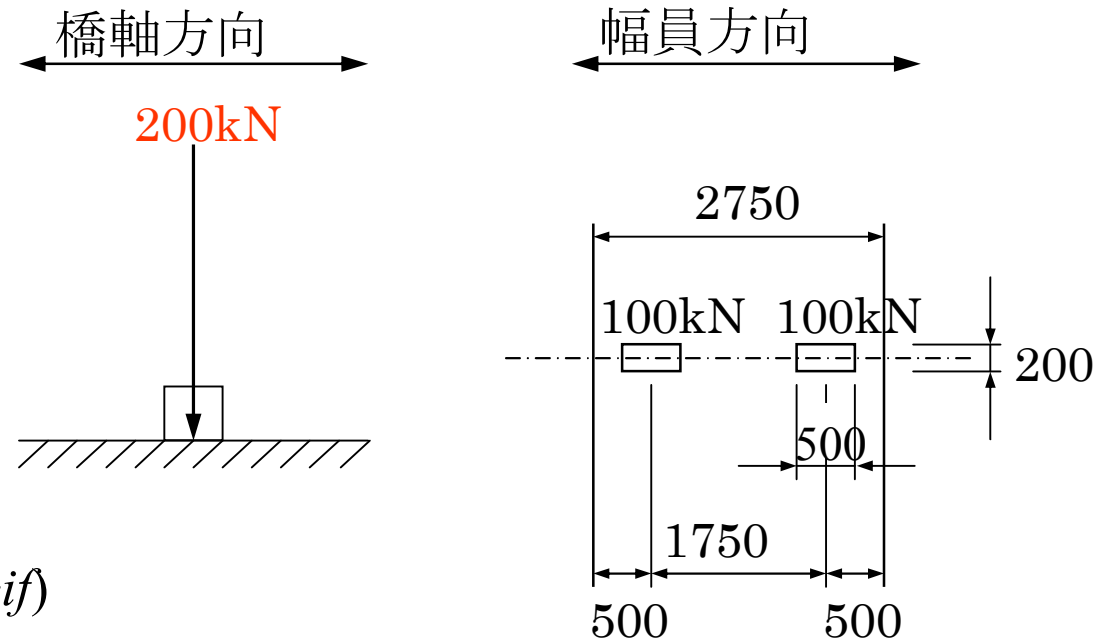
L : 支間・基線長 (m)

γ_{T2} : 同時載荷係数

i_f : 衝撃係数

γ_{T1} : 単軸のT荷重で最大級重量の多軸車両をモデル化

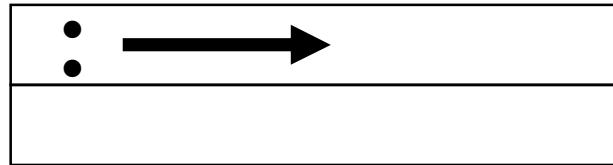
γ_{T2} : 車両の同時載荷



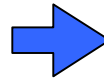
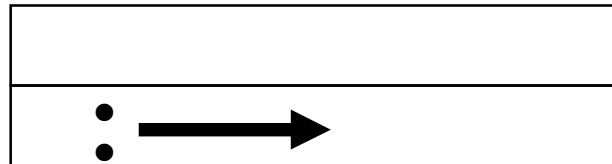
応力範囲頻度分布の計算

①応力変動の計算

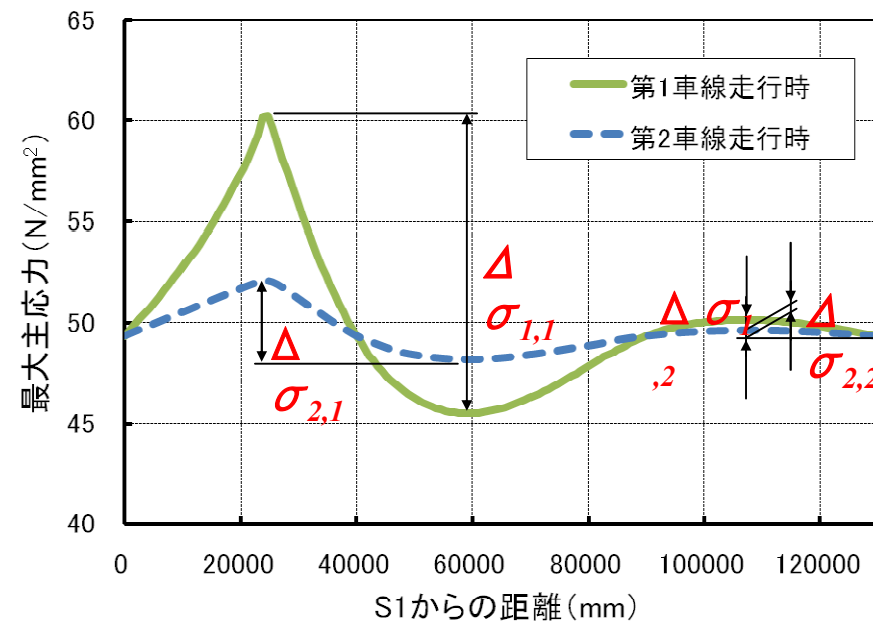
第1車線(設計寿命中の走行台数)



第2車線(設計寿命中の走行台数)



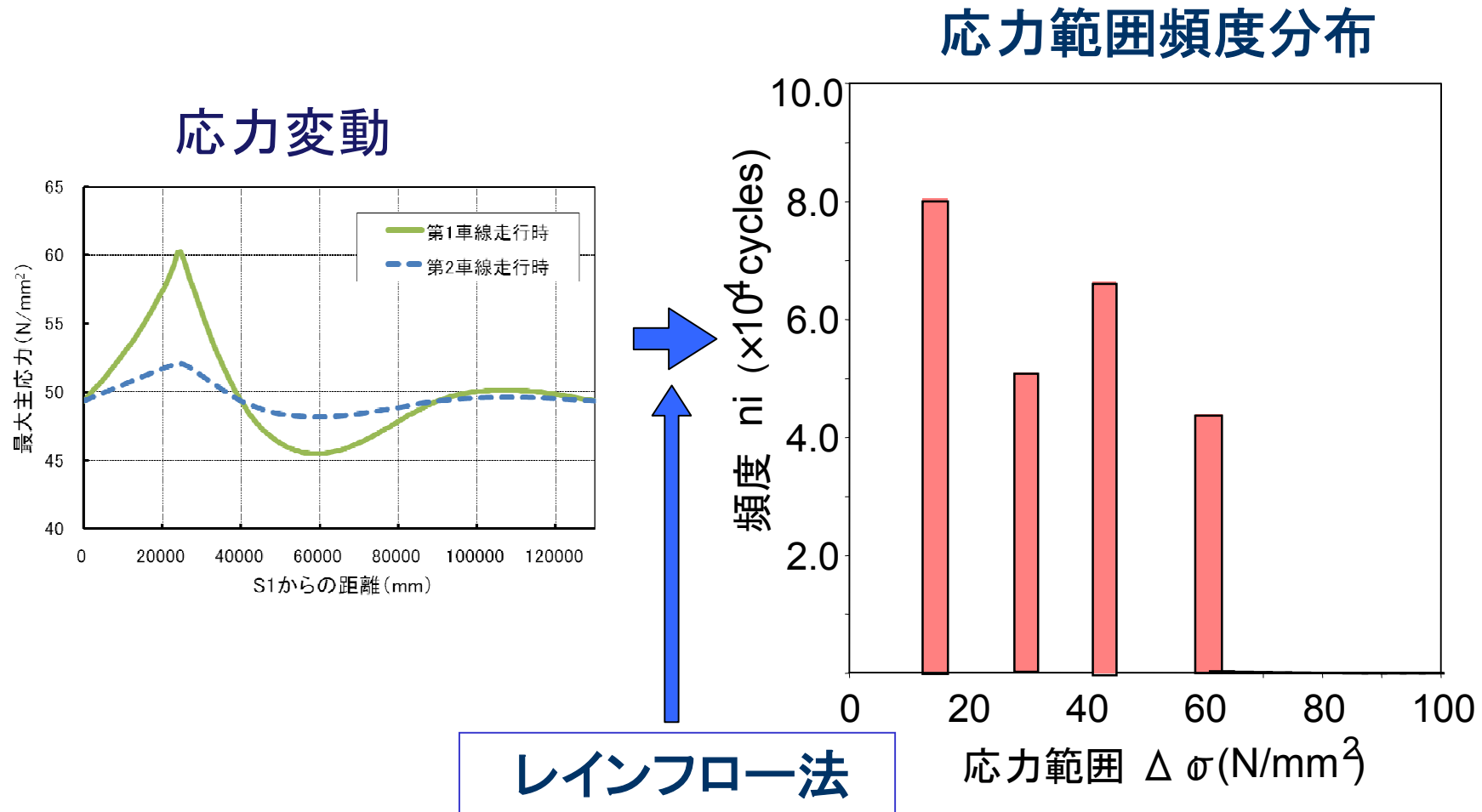
応力変動



レインフロー法

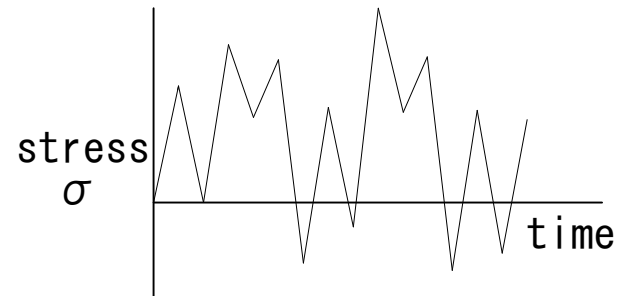
既設橋梁 → 応力測定 → 応力範囲頻度分布

②応力変動から応力範囲頻度分布への変換



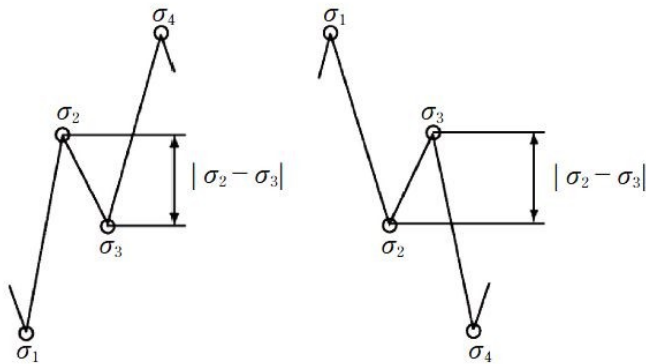
既設橋梁 → 応力測定 → 応力範囲頻度分布

レインフロー法

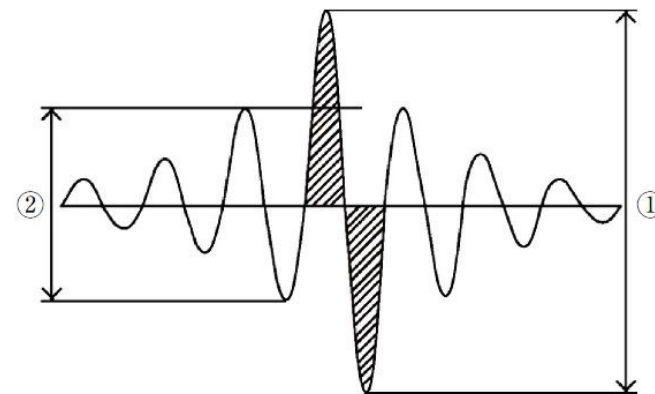


レインフロー法による応力範囲の計数の簡易化法

$\sigma_1 \geq \sigma_3 \geq \sigma_2 \geq \sigma_4$ or $\sigma_1 \leq \sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_4$ の条件を満たす場合,
 $|\sigma_2 - \sigma_3|$ の波を計数 $\rightarrow \sigma_2, \sigma_3$ を削除

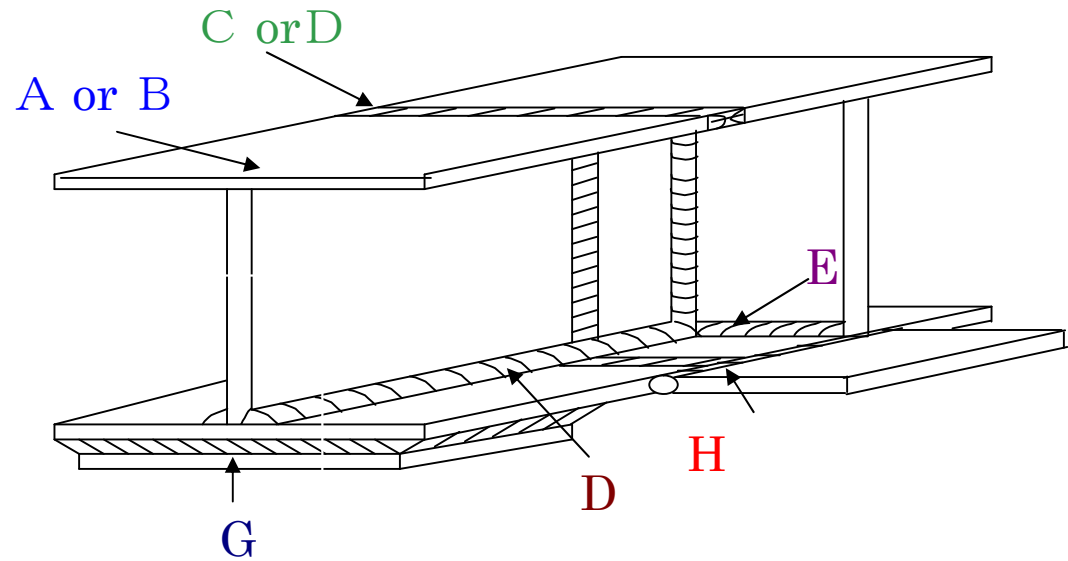
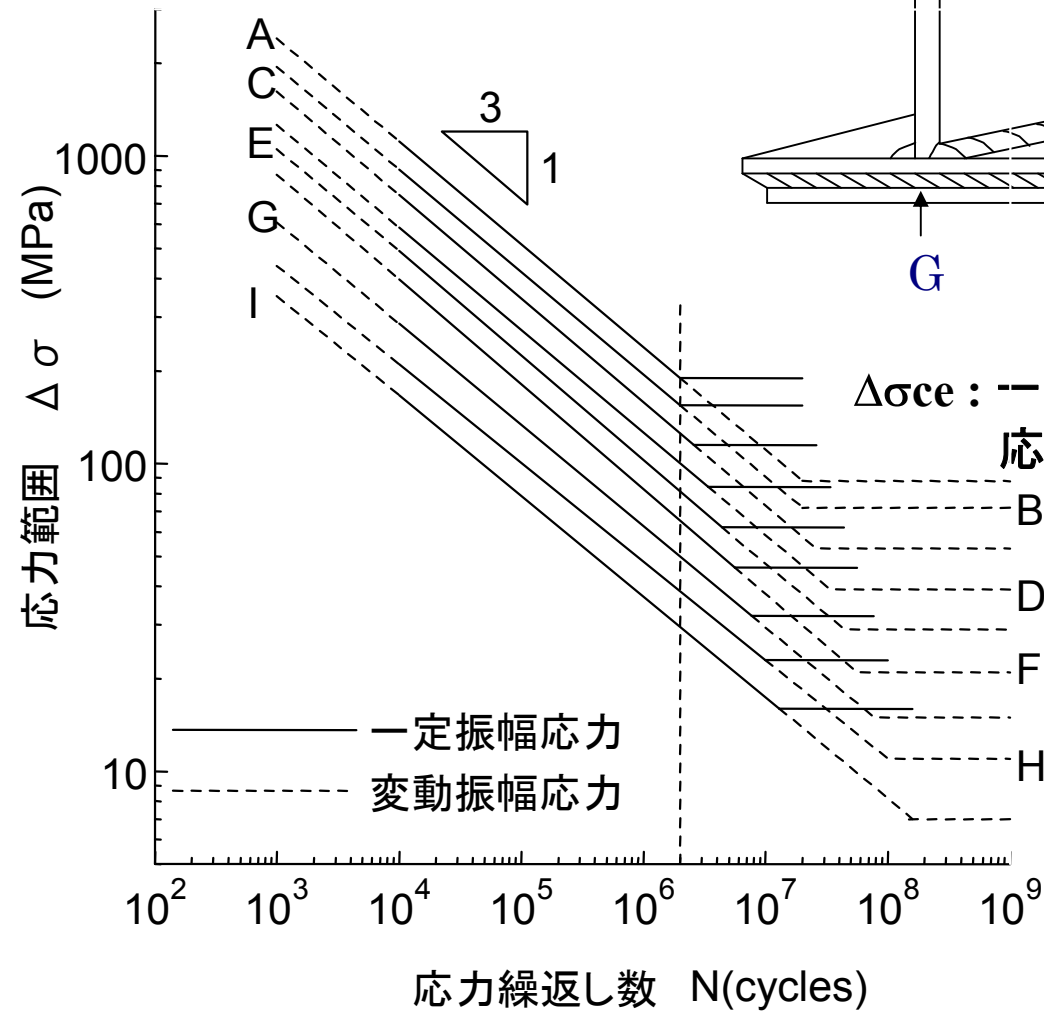


遠藤の方法



ピーク法

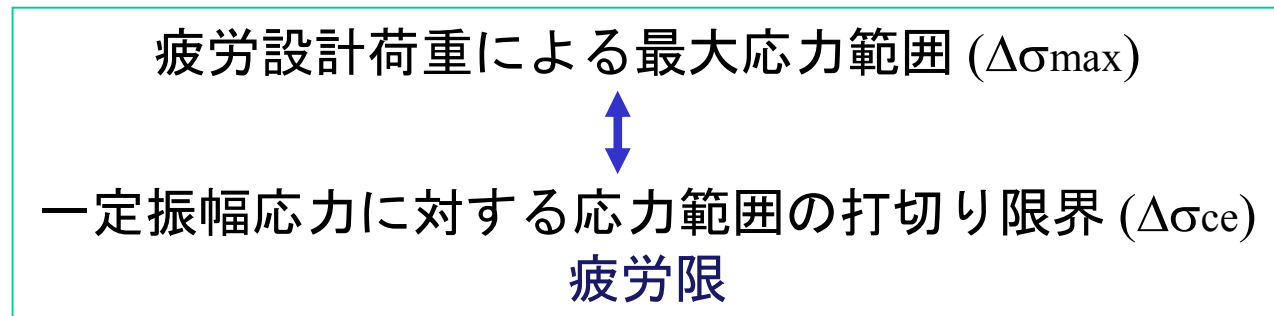
疲労強度 (疲労設計曲線)



$\Delta \sigma_{ce}$: 一定振幅応力に対する
応力範囲の打切り限界 (疲労限)

$\Delta \sigma_{ve}$: 変動振幅応力に対する
応力範囲の打切り限界

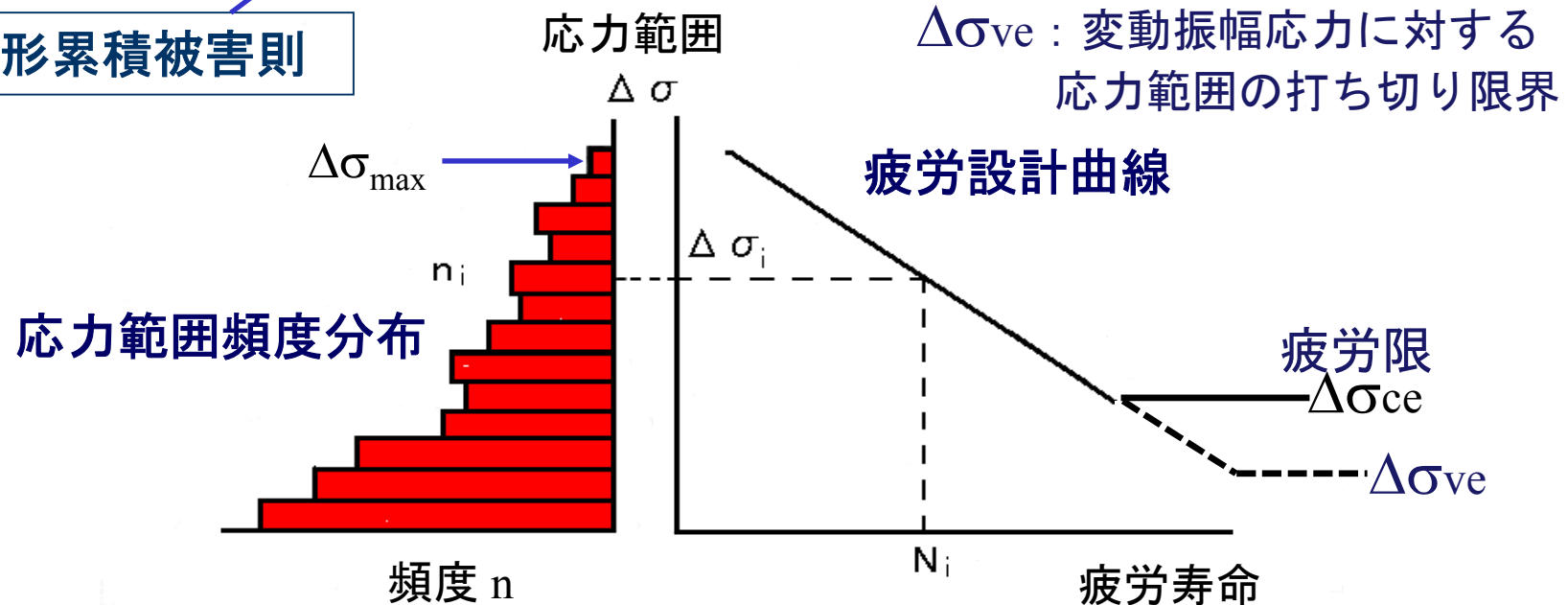
疲労照査



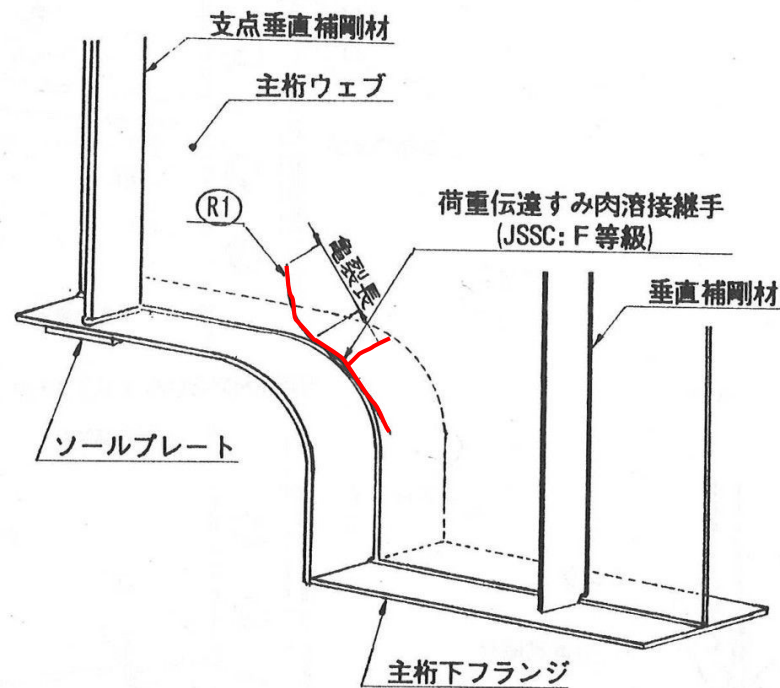
$\Delta\sigma_{\max} > \Delta\sigma_{ce}$ の場合
 $\sum (n_i / N_i) \leq 1$

n_i : 応力範囲 $\Delta\sigma_i$ の頻度
 N_i : $\Delta\sigma_i$ に対応する疲労寿命

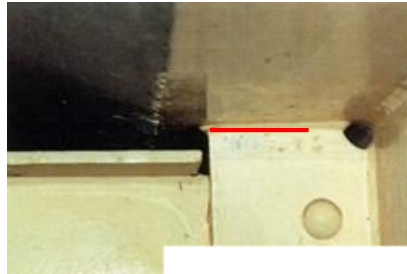
線形累積被害則



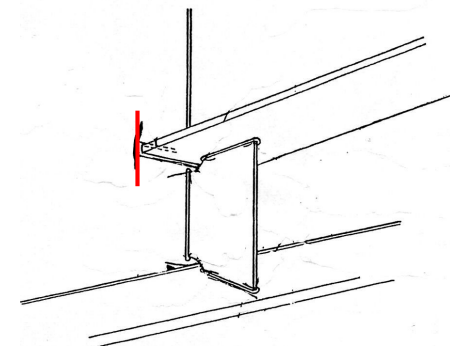
2. 鋼道路橋の疲労損傷事例 とその原因究明



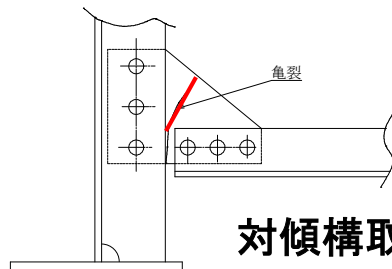
疲労損傷マップ(桁橋)



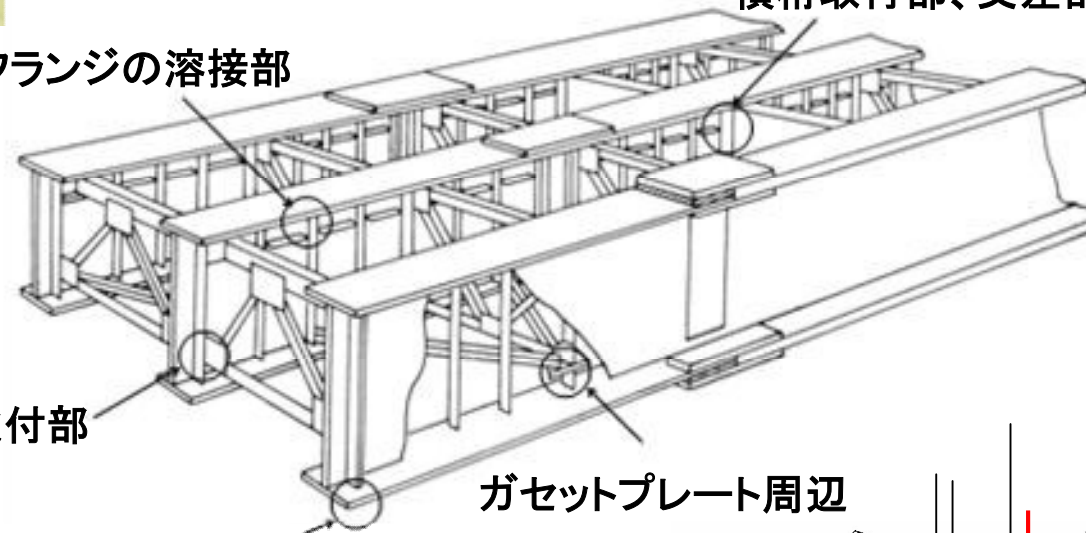
補剛材とフランジの溶接部



横桁取付部、交差部

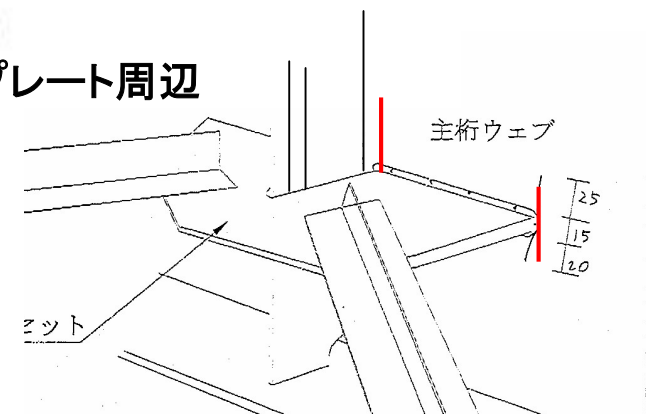
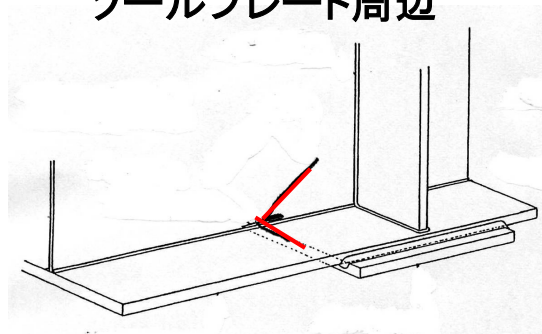


対傾構取付部



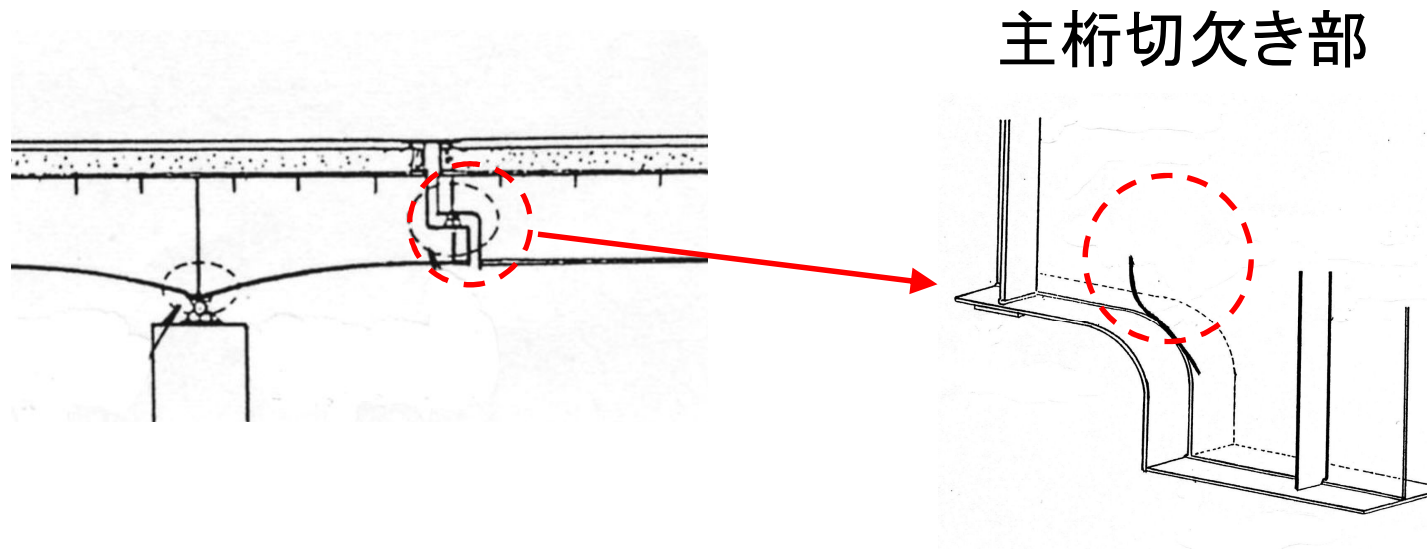
ガセットプレート周辺

ソールプレート周辺



ミット

疲労損傷マップ(桁橋)



疲労損傷事例の理解

多くの場合、疲労き裂発生原因は同じ

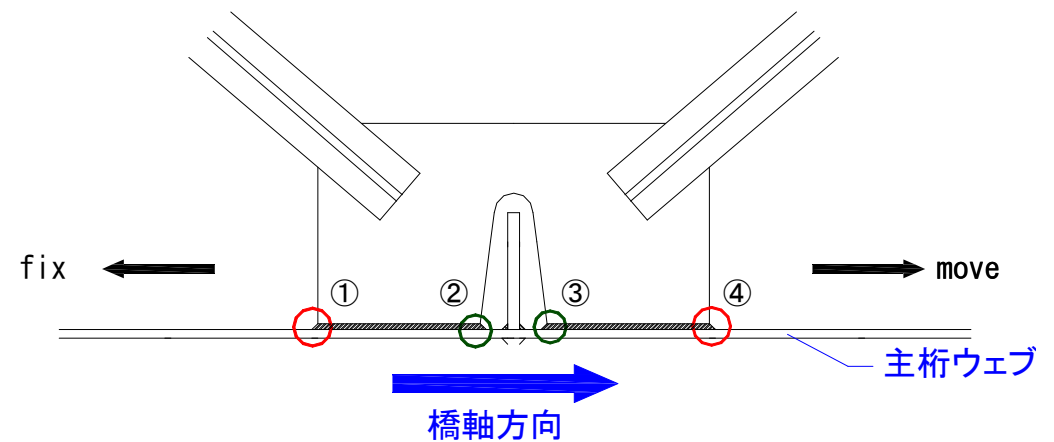
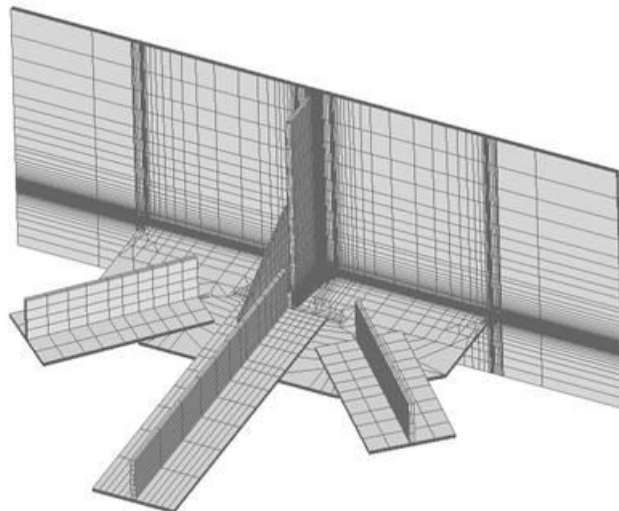
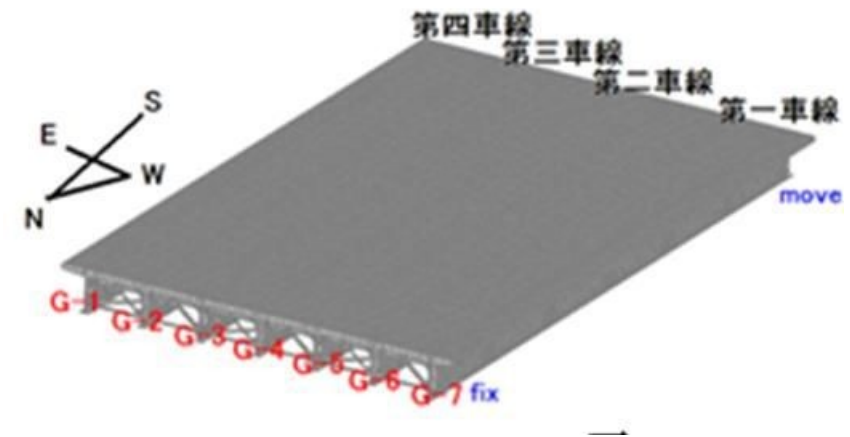
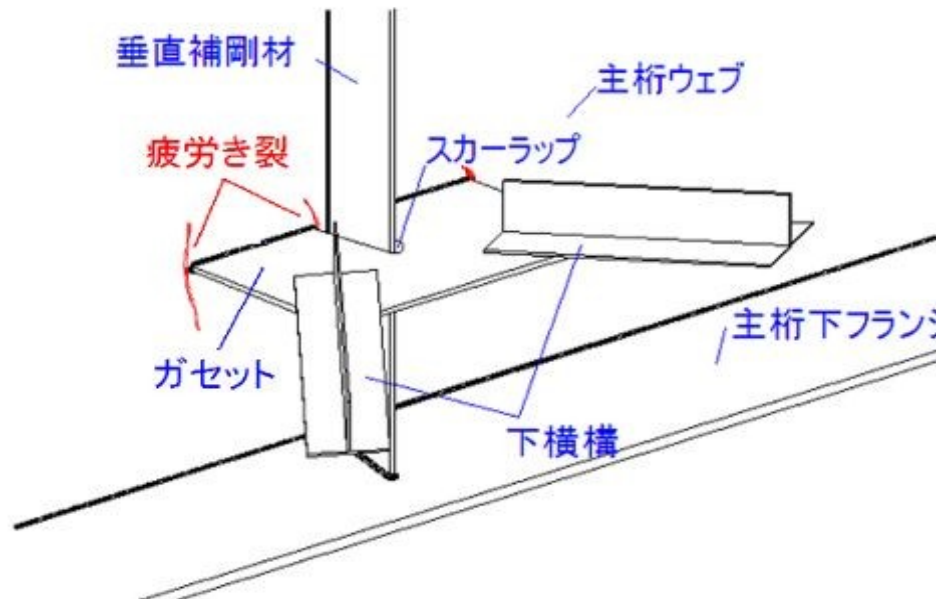
損傷の発生原因

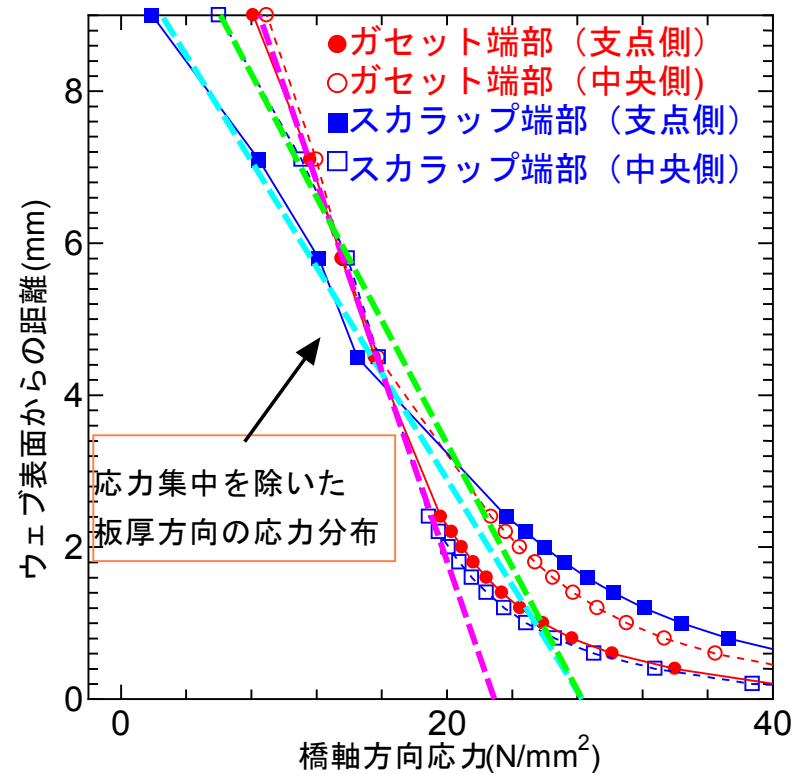
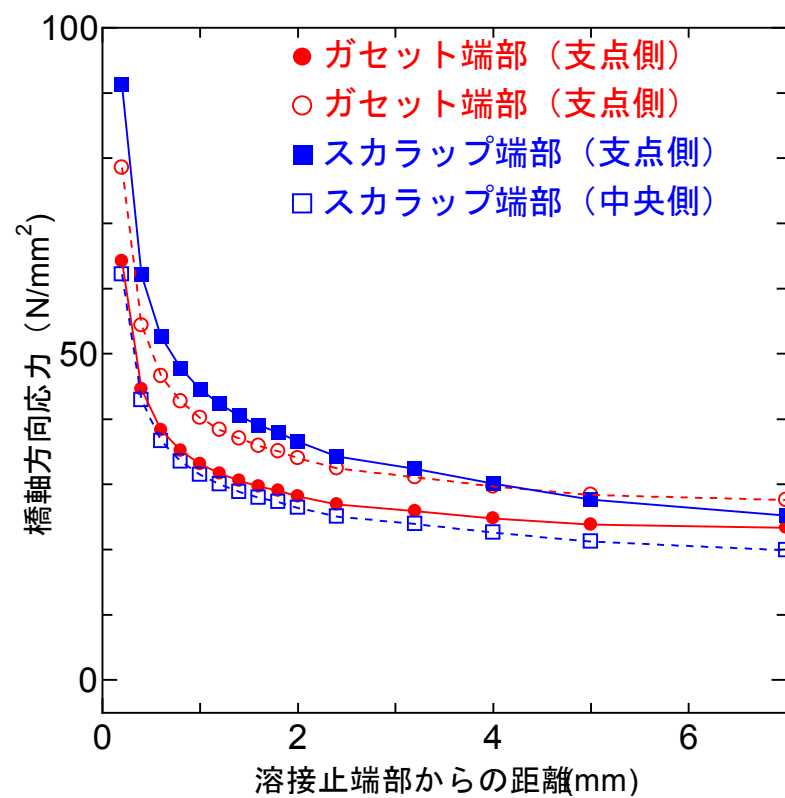
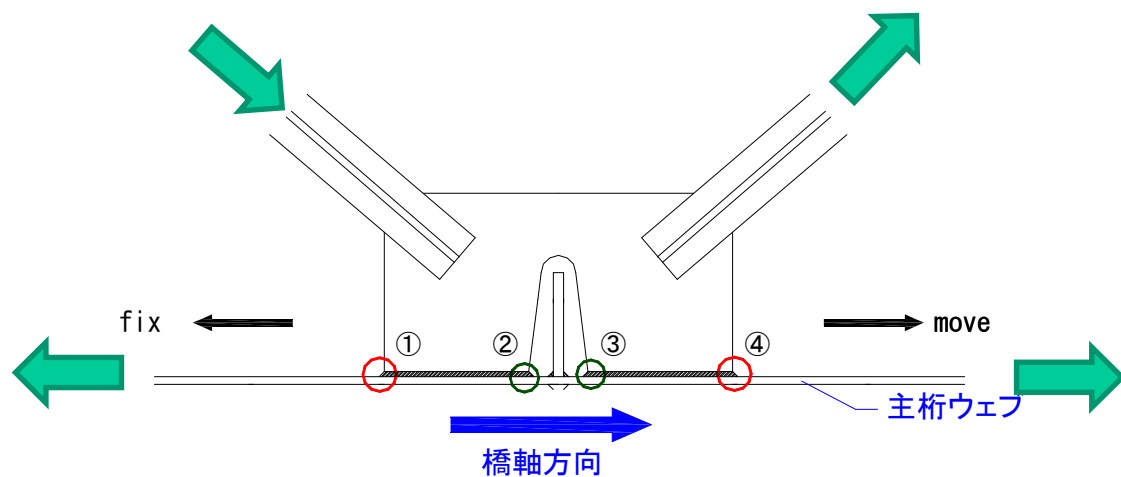
応力範囲 $>$ 疲労強度

応力範囲が高い理由: 知らなかった、構造が不適切

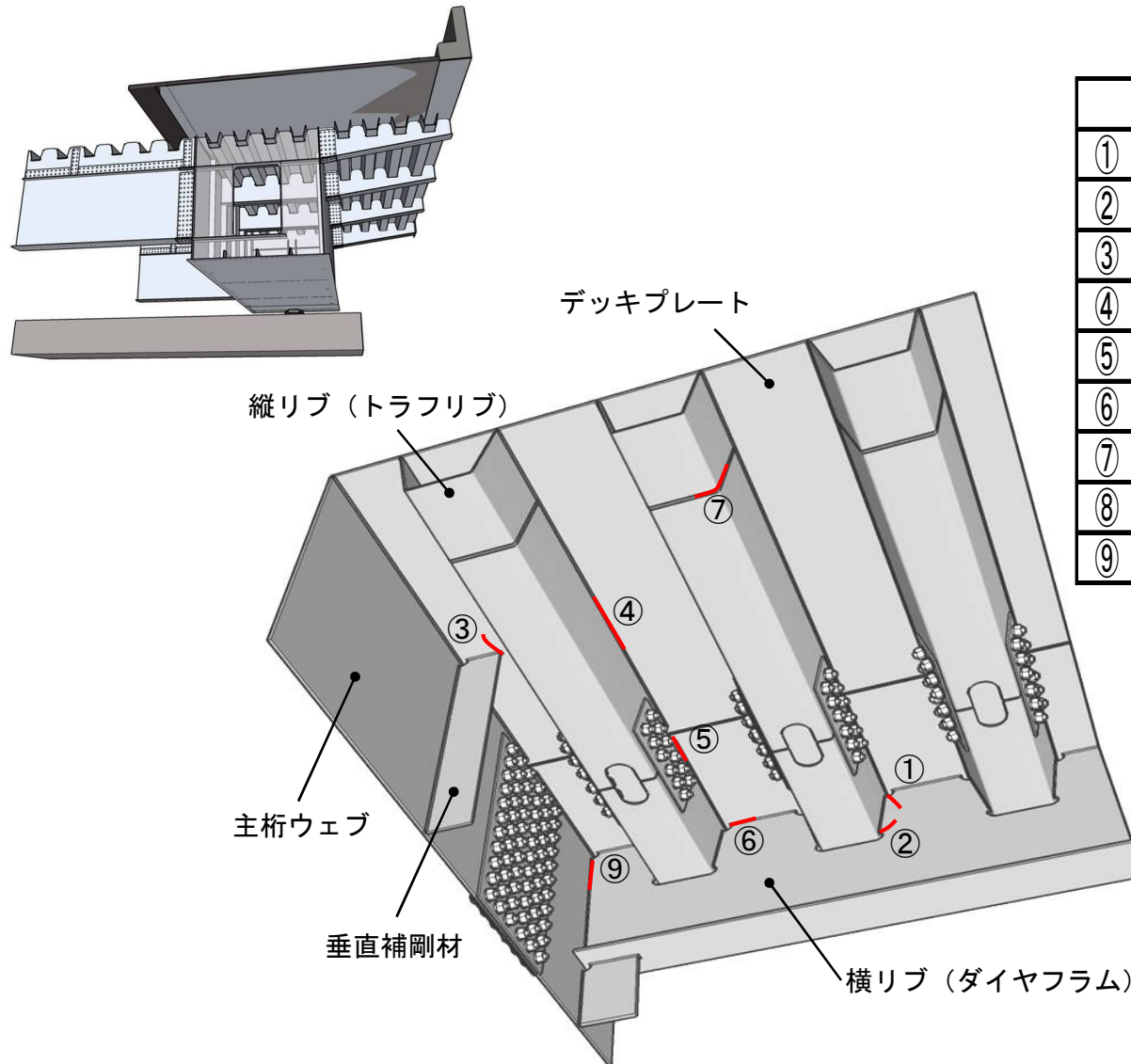
疲労強度が低い理由: 溶接きず、.....

下横構を取付けたガセット部の疲労損傷の原因

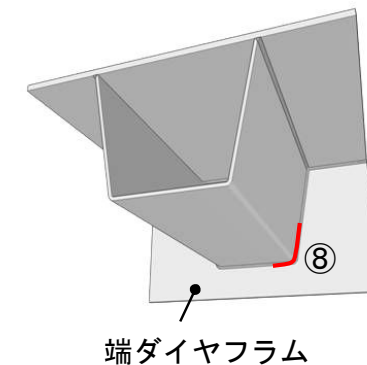




疲労損傷マップ(閉断面リブ構造の鋼床版)

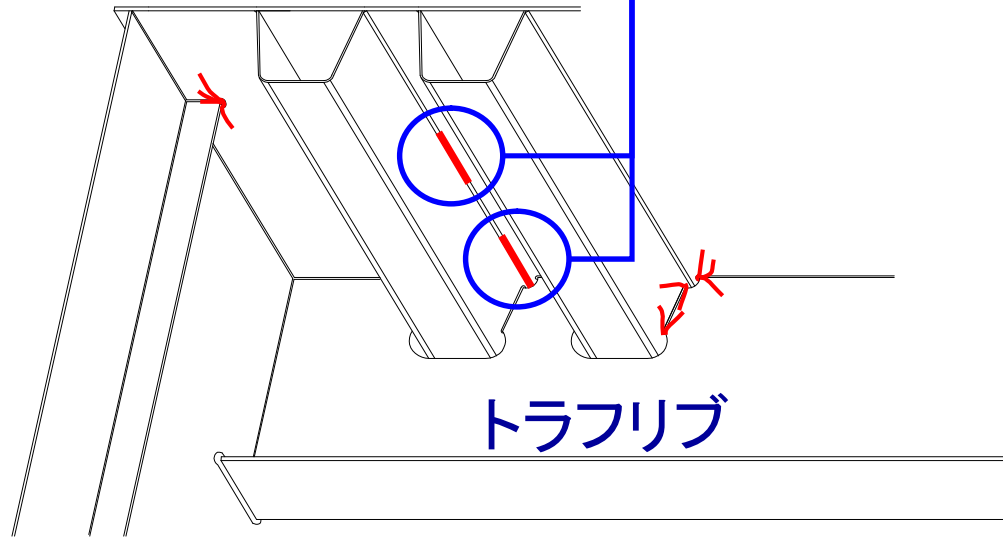


	き裂発生部位
①	縦リブと横リブ(ダイヤフラム)の溶接部(上側スカラップ部)
②	縦リブと横リブ(ダイヤフラム)の溶接部(下側スリット部)
③	デッキプレートと垂直補剛材の溶接部
④	デッキプレートと縦リブの溶接部
⑤	デッキプレートと縦リブスカラップの溶接部(現場継手部)
⑥	デッキプレートと横リブ(ダイヤフラム)の溶接部
⑦	縦リブと縦リブの突合せ溶接部
⑧	縦リブと端ダイヤフラムの溶接部
⑨	横リブ(ダイヤフラム)と主桁ウェブの溶接部



デッキプレート・トラフリブ溶接部のき裂

デッキプレート

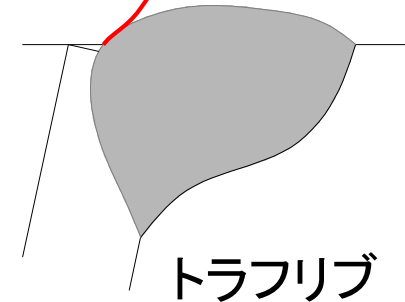


トラフリブ

デッキプレート・トラフリブ溶接部

デッキプレート

デッキき裂



トラフリブ

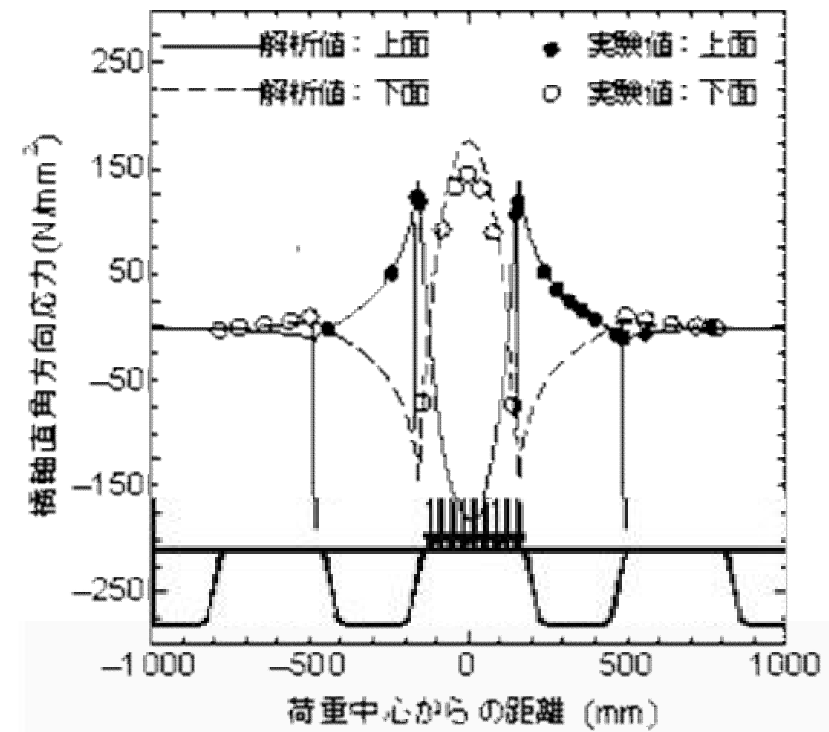
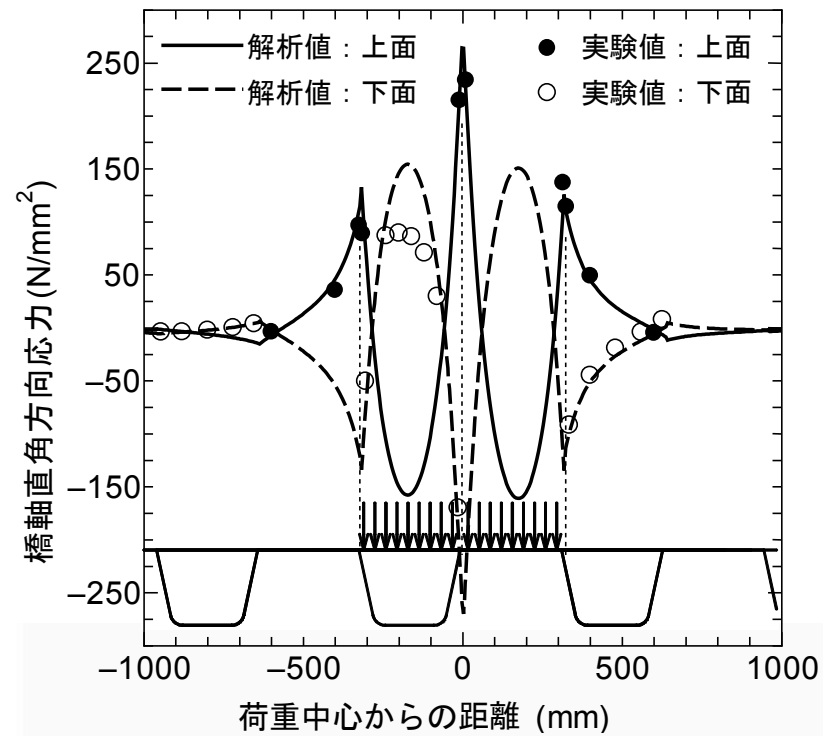
- ・デッキプレートとトラフリブの変形が複雑
- ・デッキプレートとトラフリブの接合
→片面すみ肉溶接

ルート部に高い応力集中が生じる

＜実橋での損傷事例＞



き裂の発生原因



デッキプレートの変形

3. 疲労損傷対策とその考え方

予防保全：損傷が生じる前

補修・補強：損傷が生じた後

原因：構造の不具合、溶接部の不具合

疲労強度が低い、応力が高い

対策：不具合の解消

疲労強度を高くする、応力を低くする

疲労対策：予防保全（疲労強度改善法）

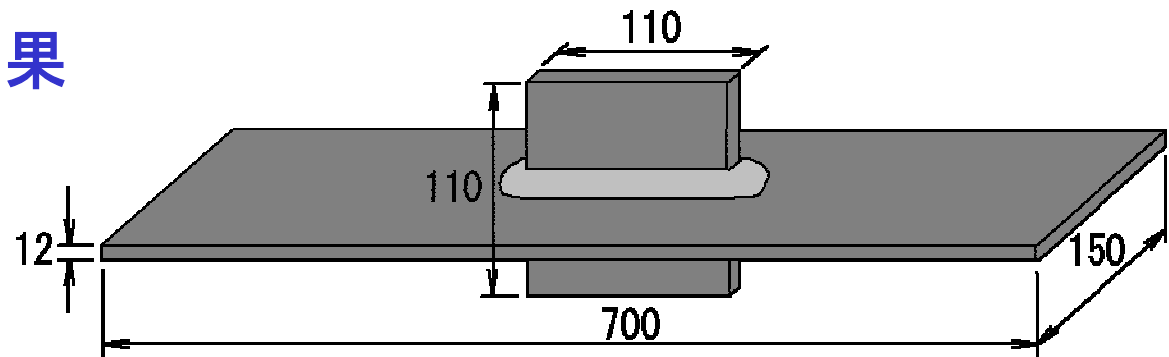
応力集中の軽減（溶接止端形状の改善）
グライнда処理、TIG処理

圧縮残留応力の導入
低変態温度溶接材料

応力集中の軽減＋圧縮残留応力の導入
ピーニング（ブラスト、ハンマー、UIT、……）

グラインダ仕上げの効果

溶接まま



バーグラインダ



止端部未処理



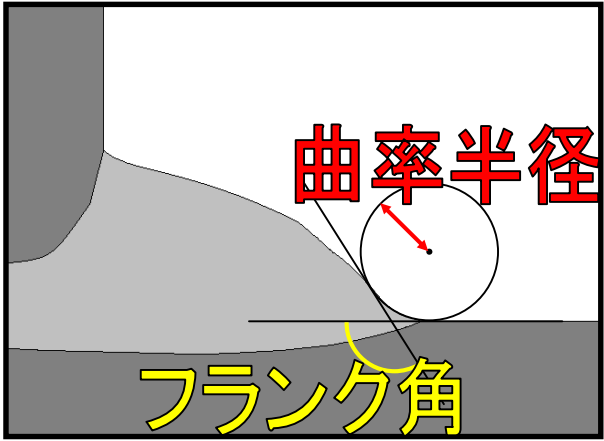
ディスクグラインダ

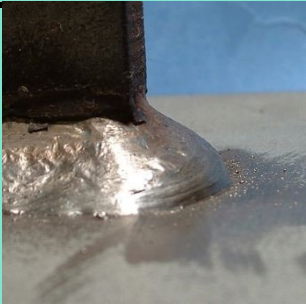
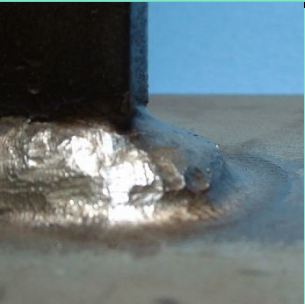


止端ライン残し

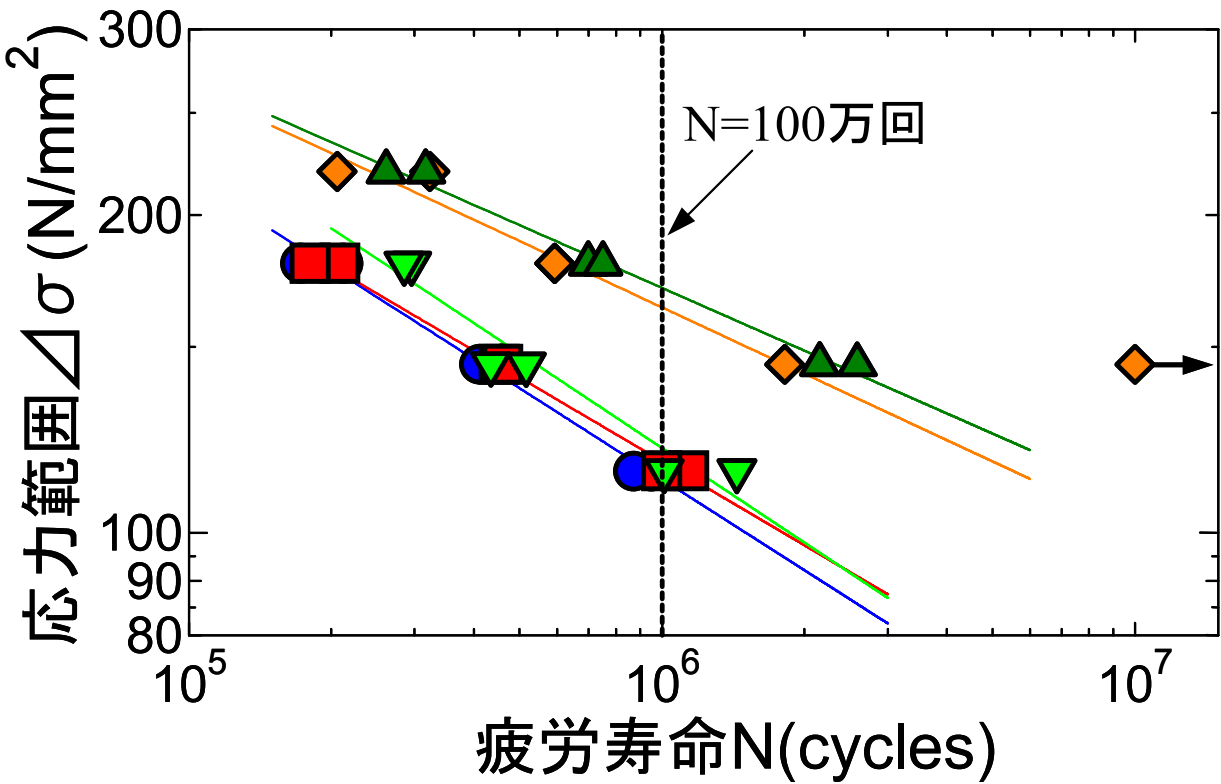


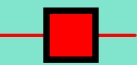
溶接部形状



	溶接まま	止端部未 処理	止端ライ ン残し	バー グライン ダ	ディスク グライン ダ
外観					
曲率半径	0.6mm	0.5mm	0.5mm	5.7mm	8.3mm
フランク 角	120°	116°	125°	121°	147°

試験結果

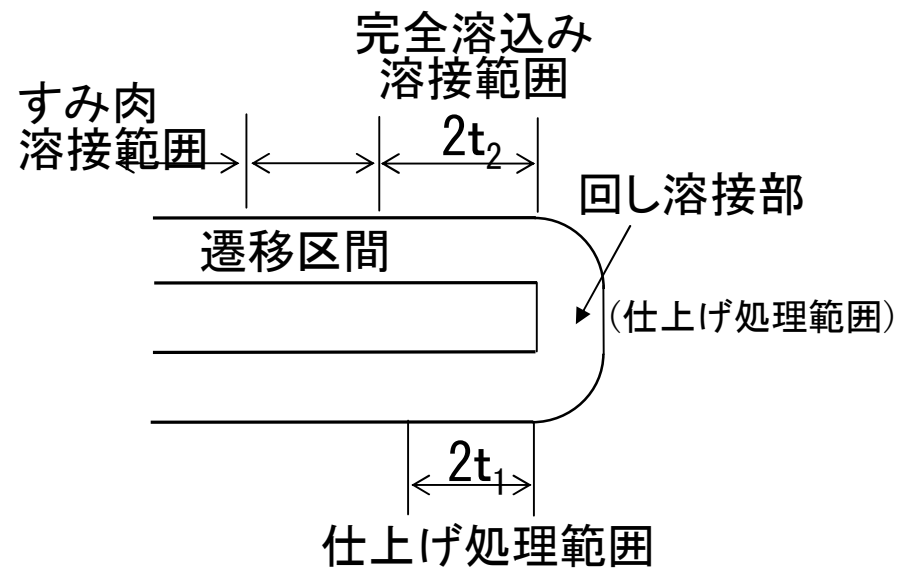


凡例	試験体	100万回疲労強度	溶接ままと比較
	溶接まま	112 N/mm ²	—
	止端部未処理	117 N/mm ²	4 % 向上
	止端ライン残し	120 N/mm ²	7 % 向上
	バークグラインダ	164 N/mm ²	45 % 向上
	ディスクグラインダ	171 N/mm ²	52 % 向上

止端半径と仕上げ範囲

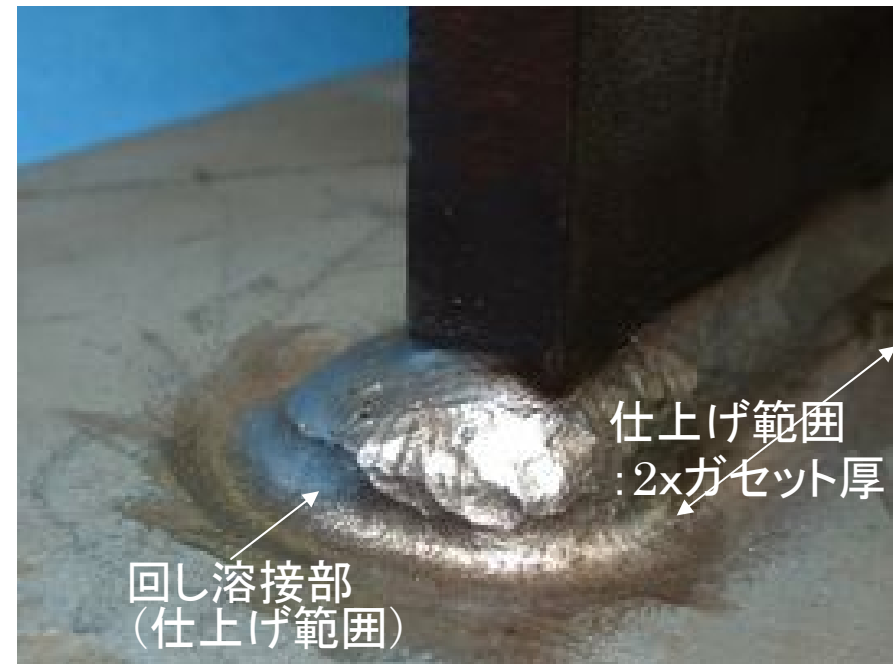
止端半径: 3mm以上

最終仕上げはバーグラインダで行う

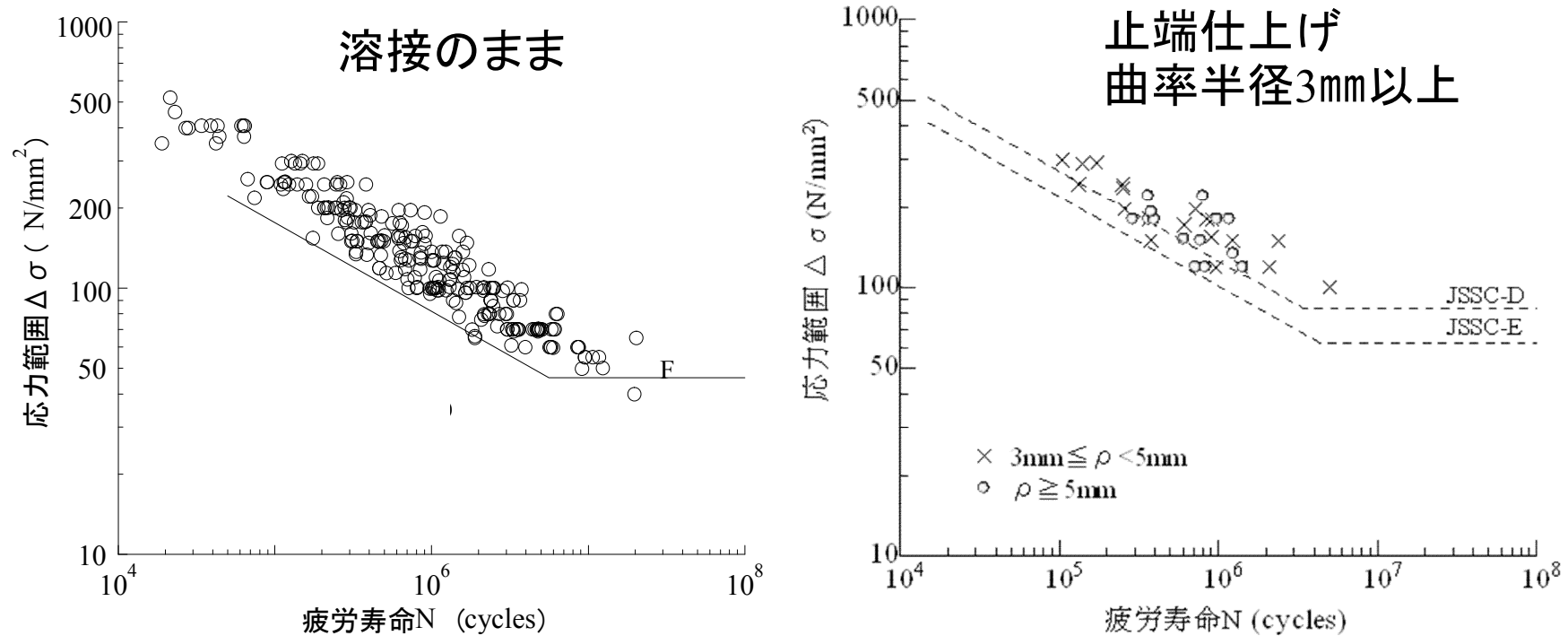


t_1 : ガセット板厚

t_2 : 母材板厚



止端曲率半径を3mm以上とした根拠

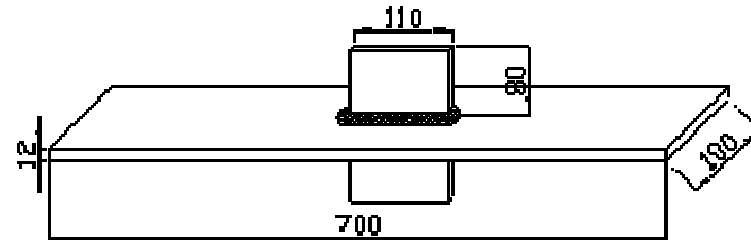


予防対策は必要に応じて行うことが重要
 不必要な箇所に行うことは無駄

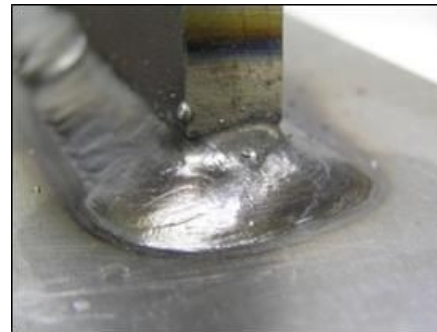
ピーニング

UIT (Ultrasonic Impact Treatment)

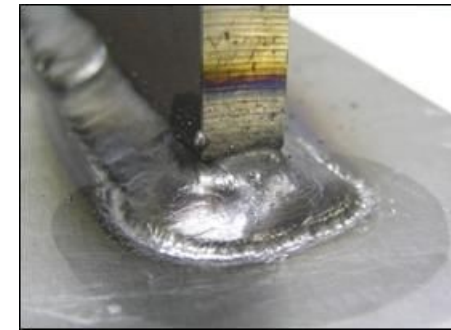
UIT装置



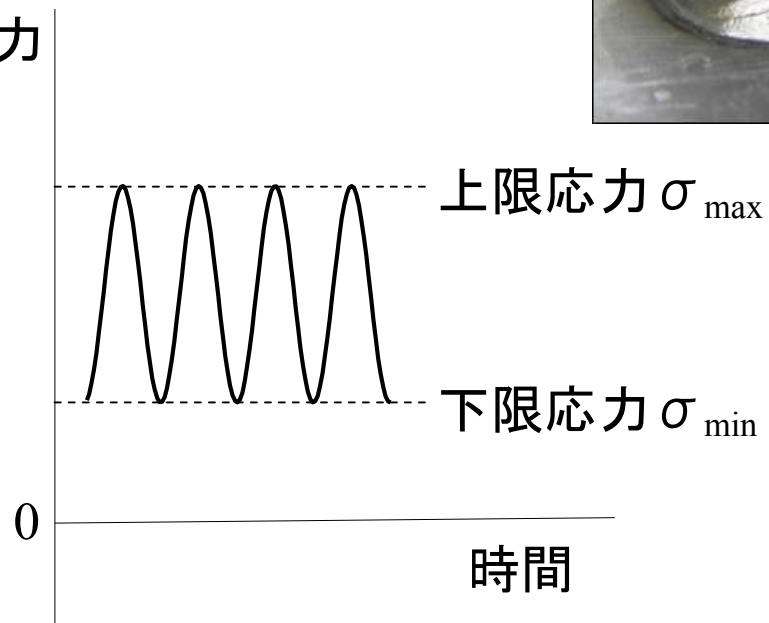
溶接のまま



UIT



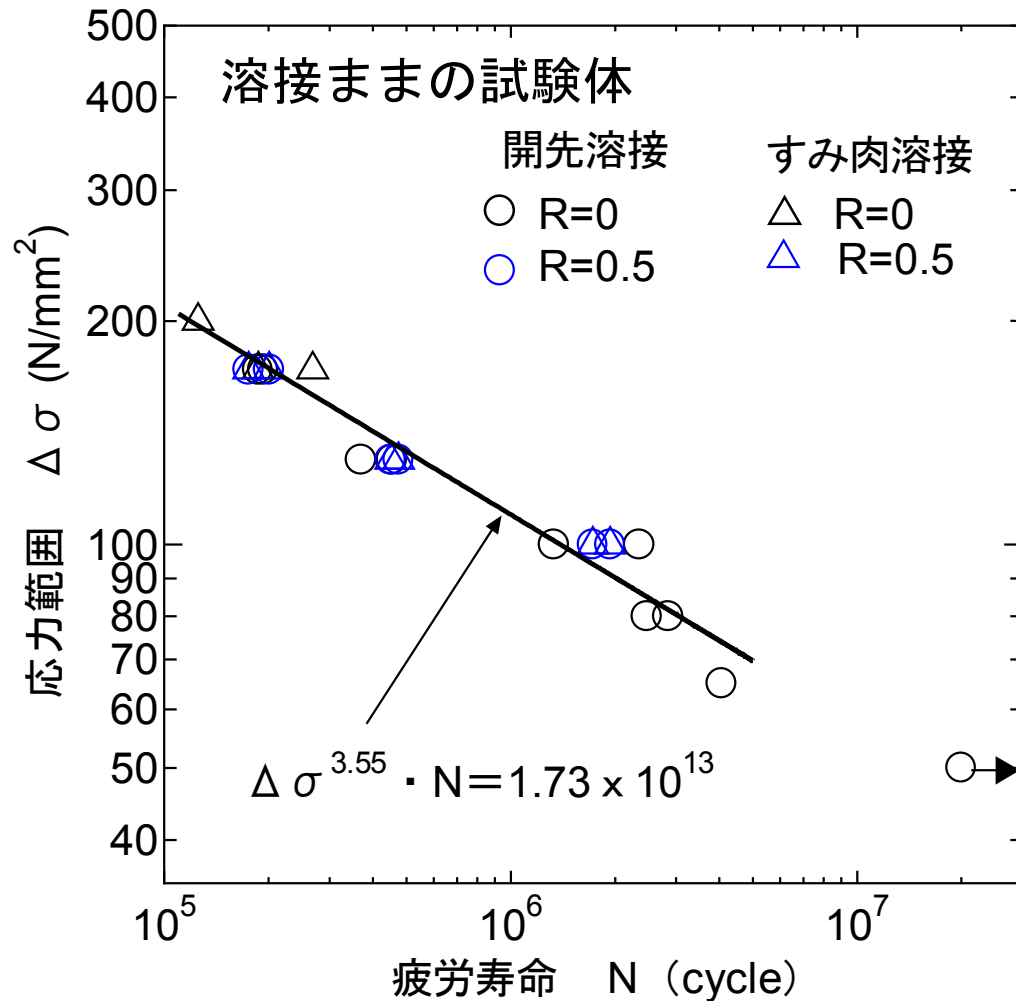
応力



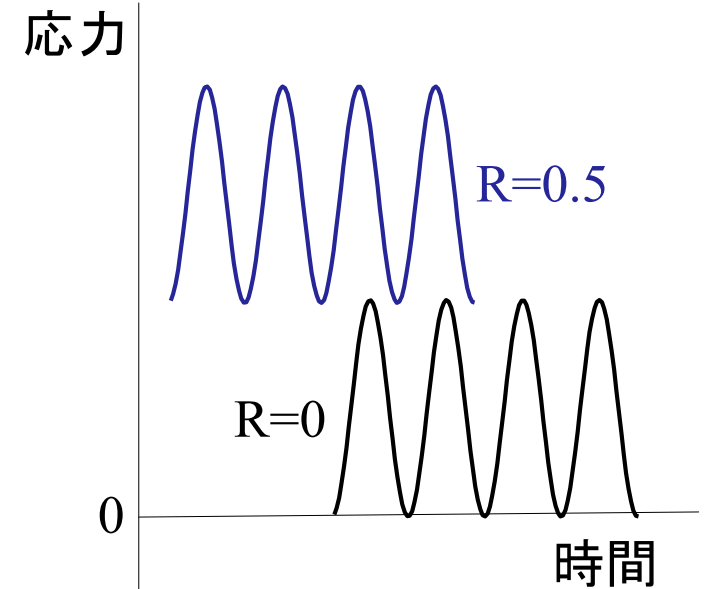
応力比R

= 下限応力 / 上限応力

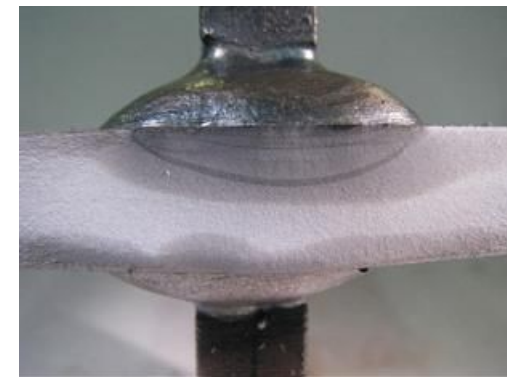
溶接まま試験体の疲労試験結果



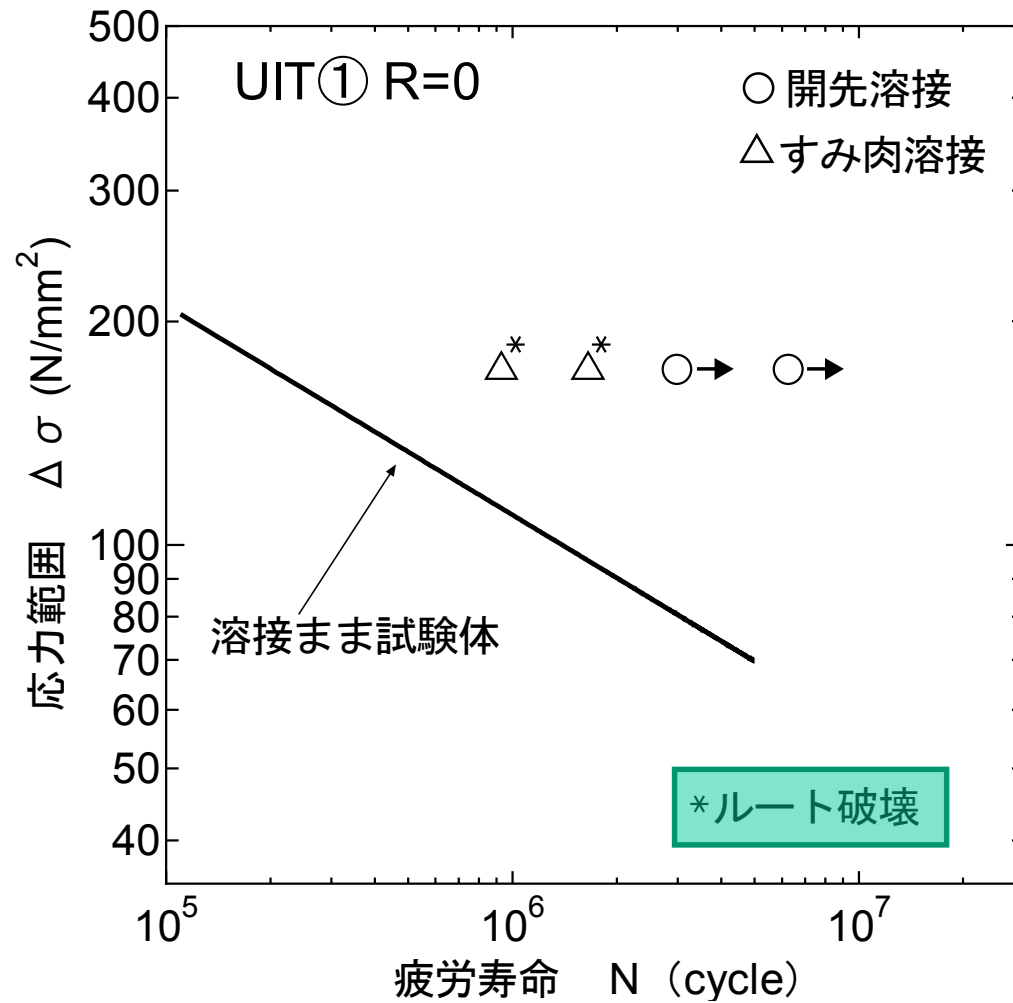
溶接による引張残留応力



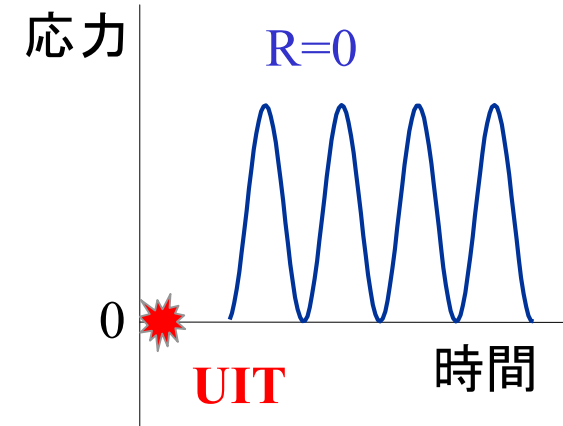
応力比R = 下限応力 / 上限応力



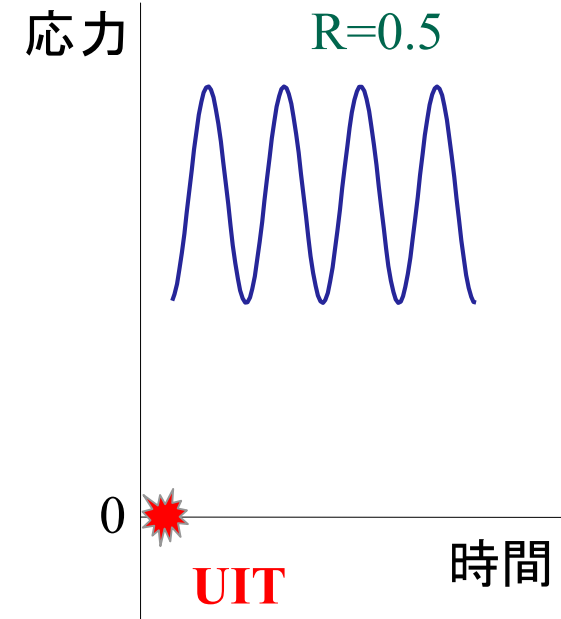
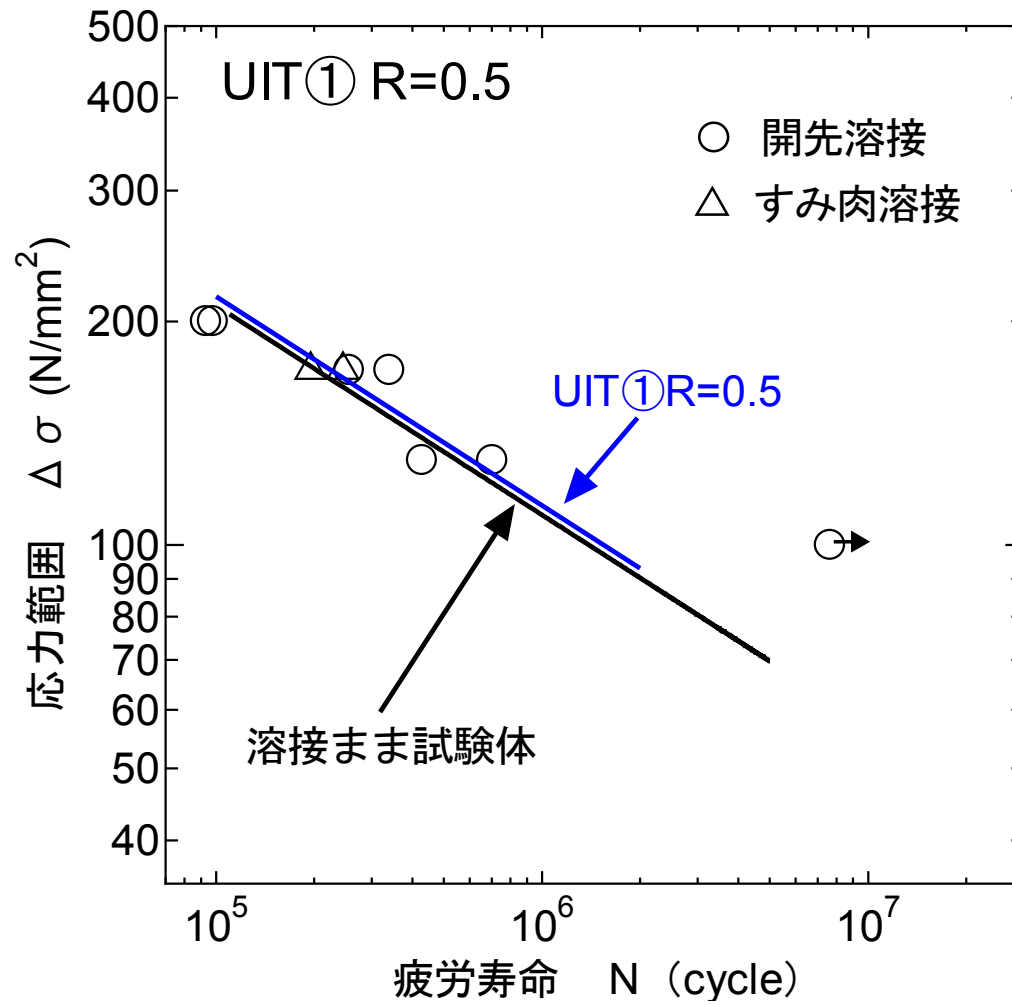
UIT試験体の疲労試験結果(R=0)



通常に処置
通常の試験条件力

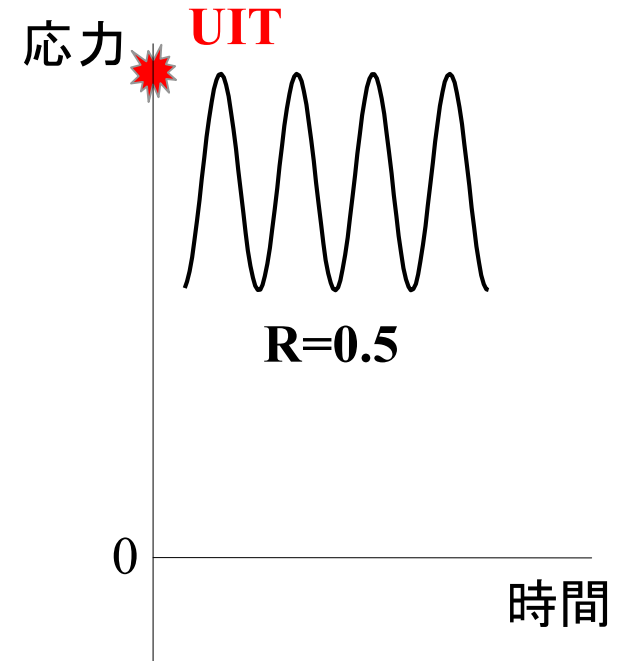
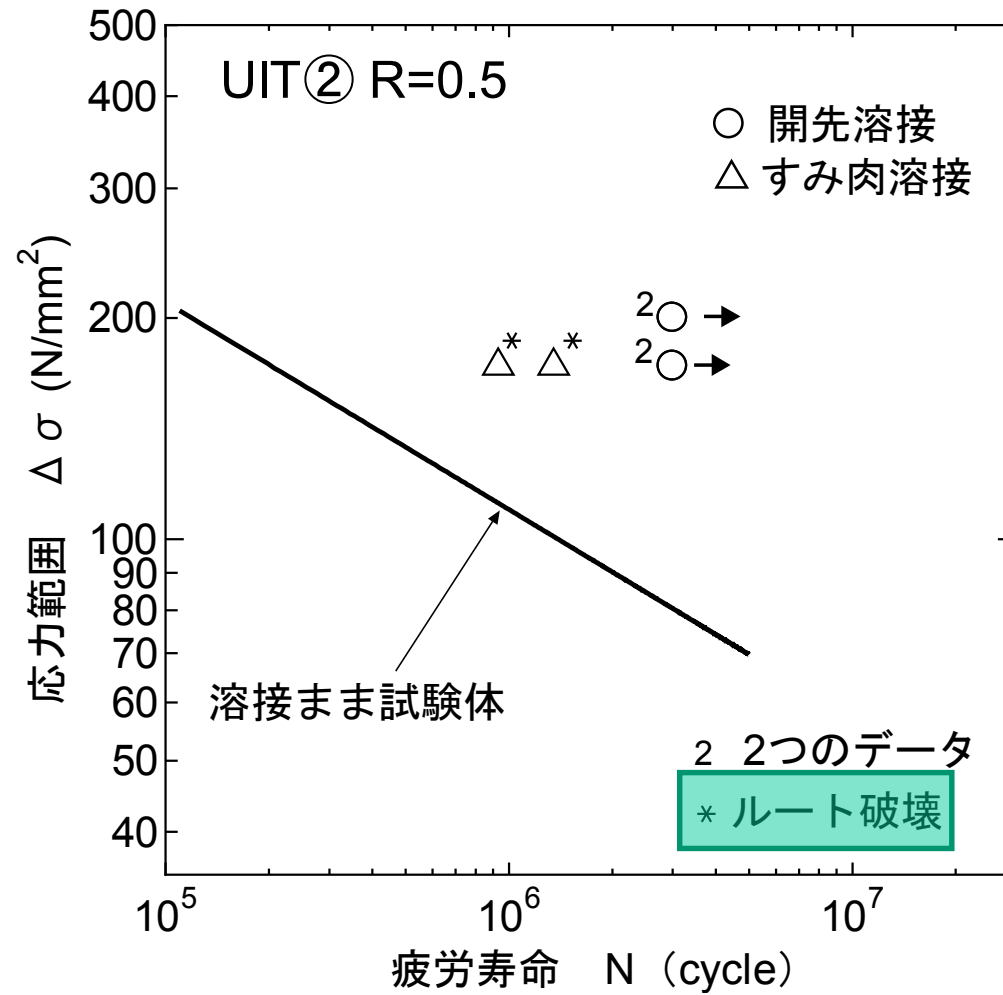


UIT試験体の疲労試験結果(R=0.5)



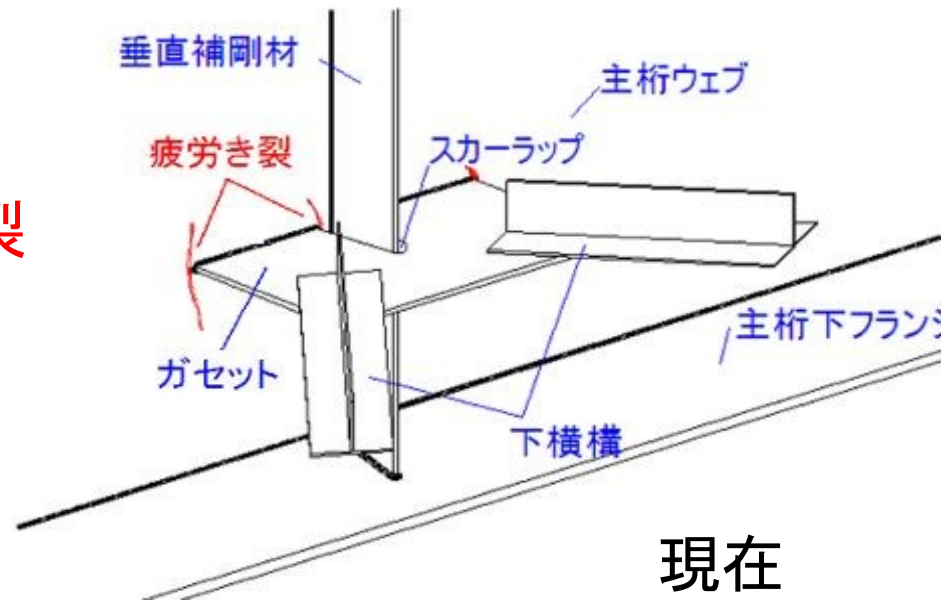
UIT試験体の疲労試験結果(R=0.5)

上限応力でUIT(既設構造物)



補修・補強

ガセット端の疲労き裂

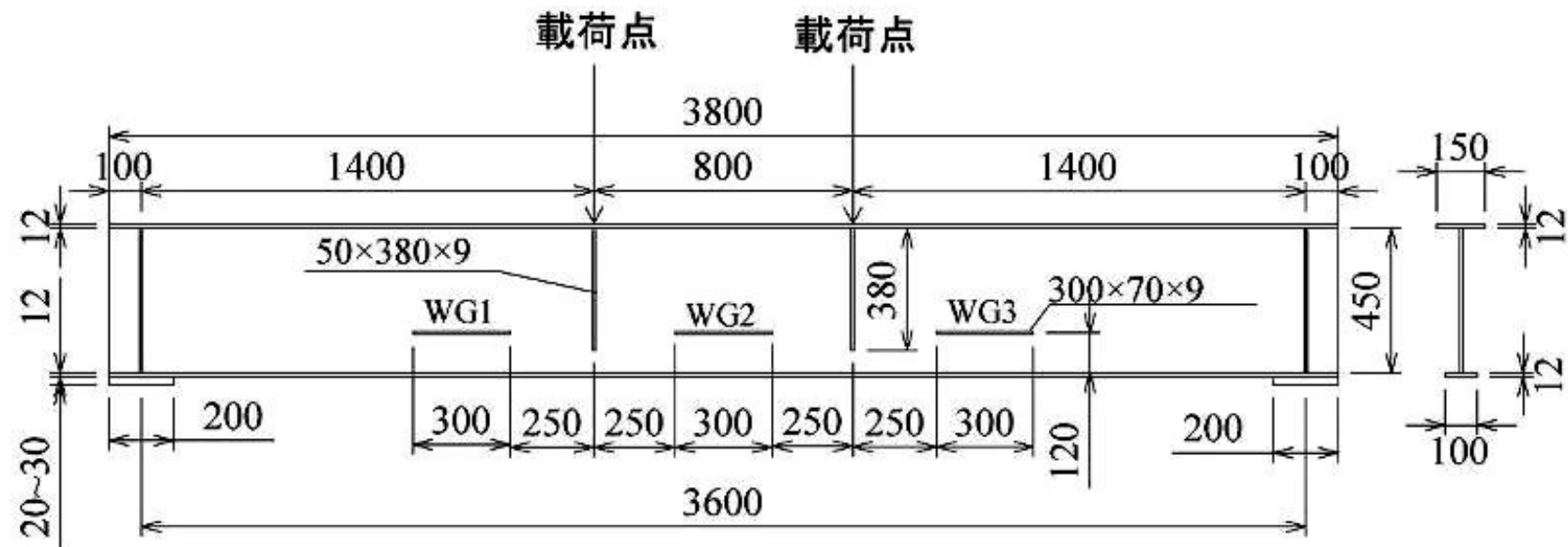


現在

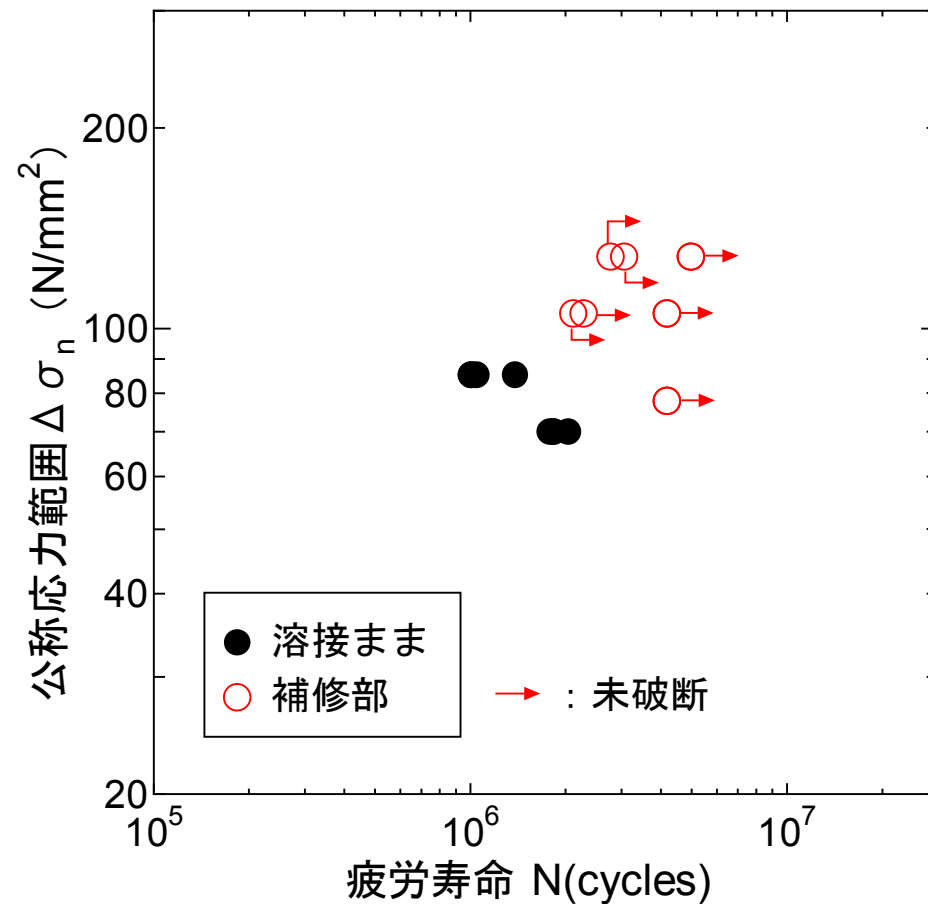
20年ほど前



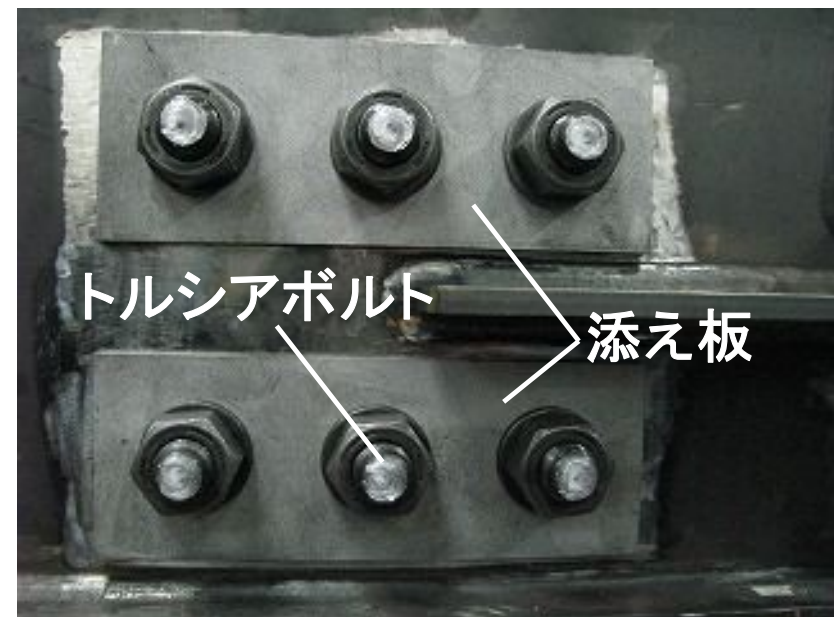
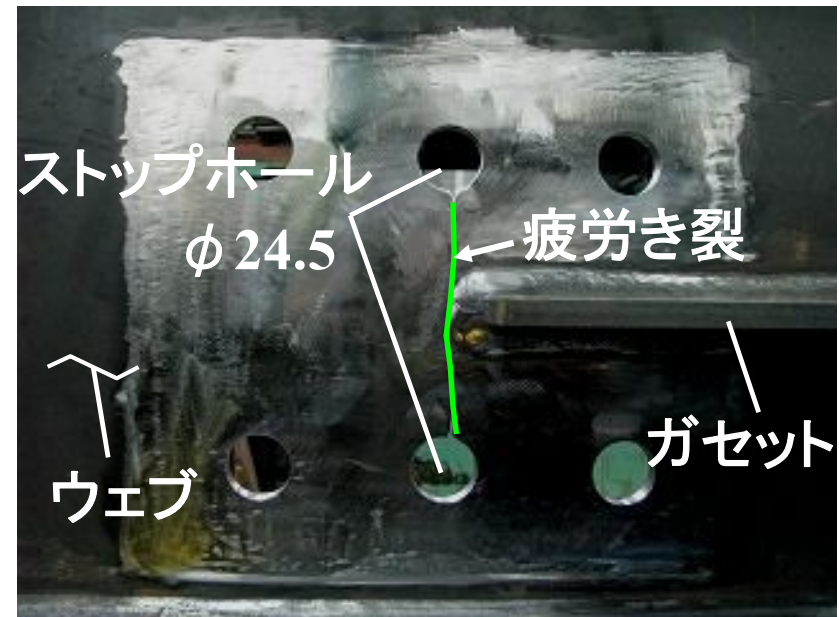
補修効果の確認



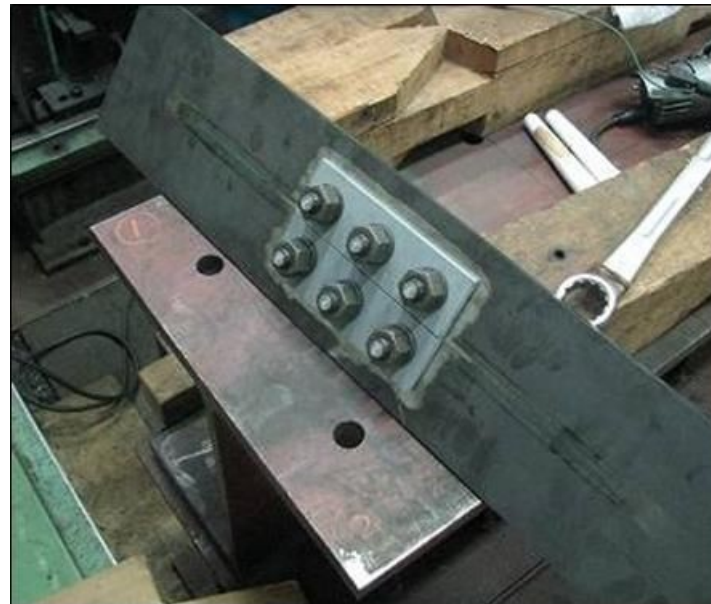
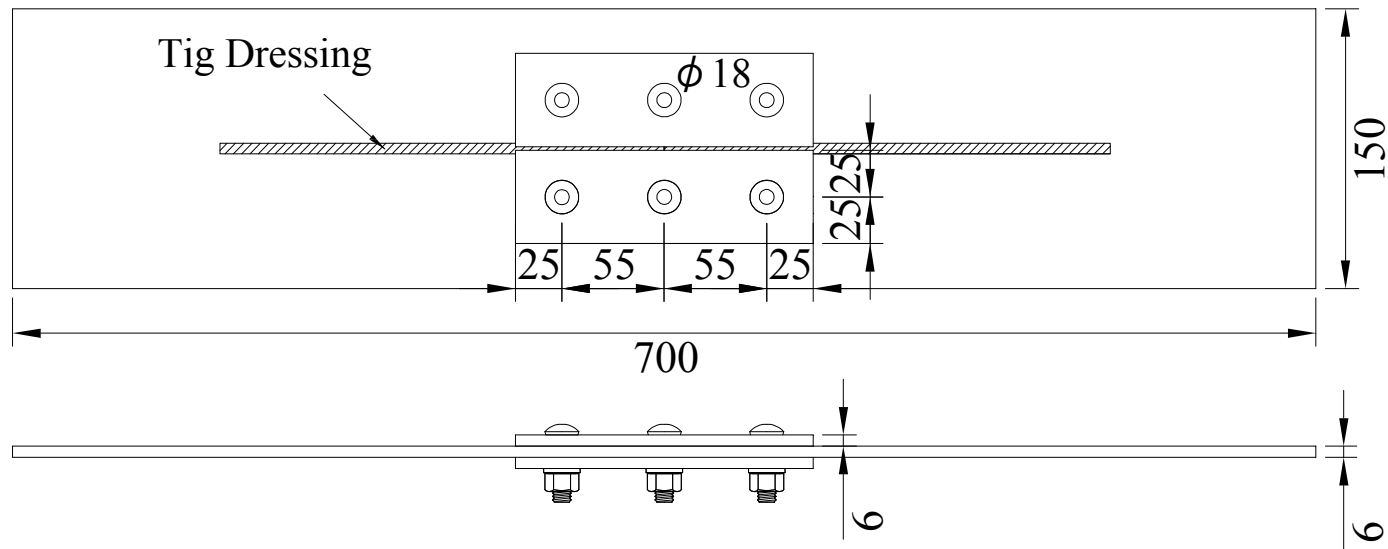
疲労試験結果



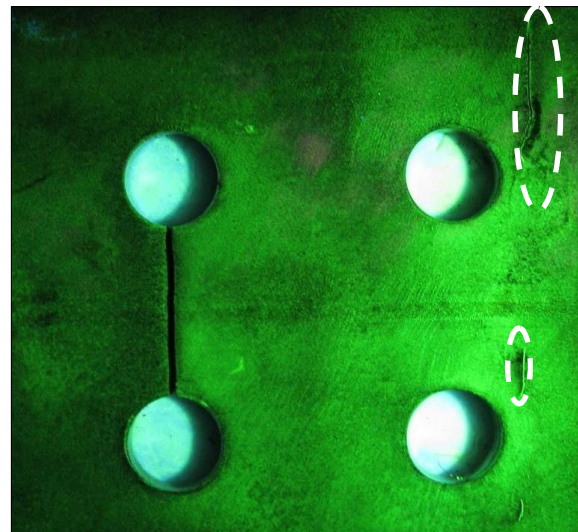
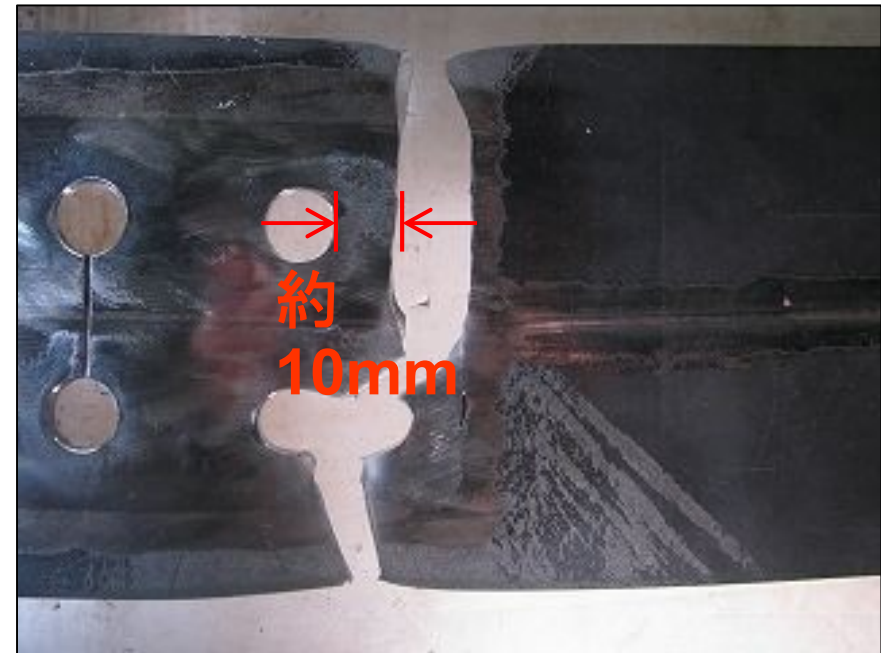
き裂先端の応力集中の軽減
添え板による応力伝達



小型試験体の疲労試験(破壊起点と疲労強度の確認)



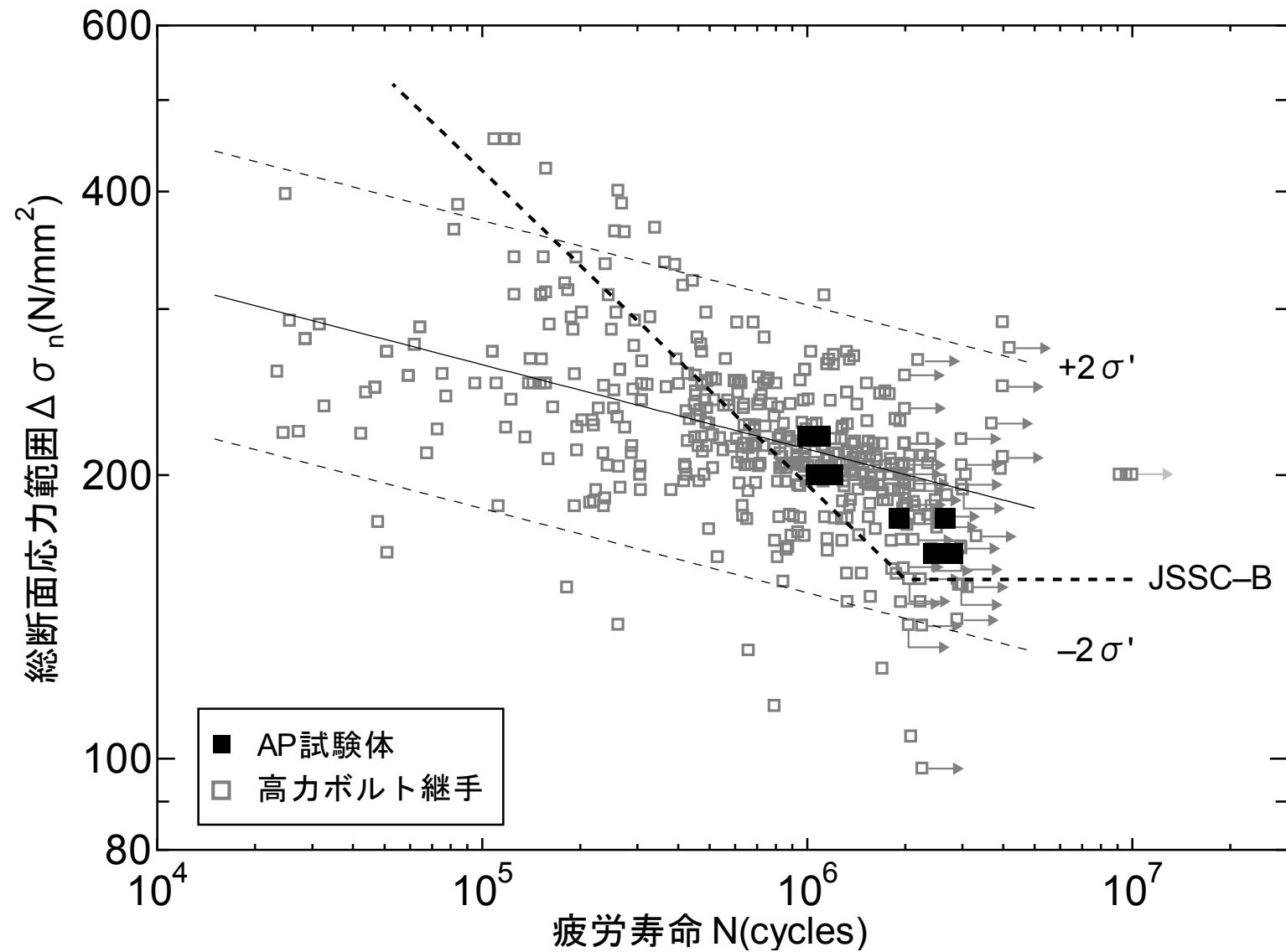
疲労破壊



高力ボルト摩擦接合継手
と同じ破壊形態

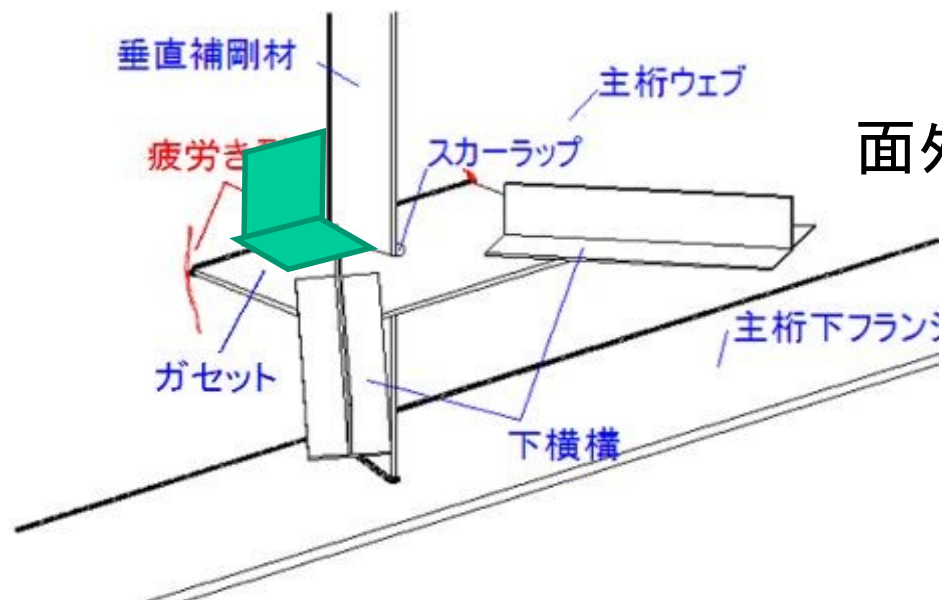
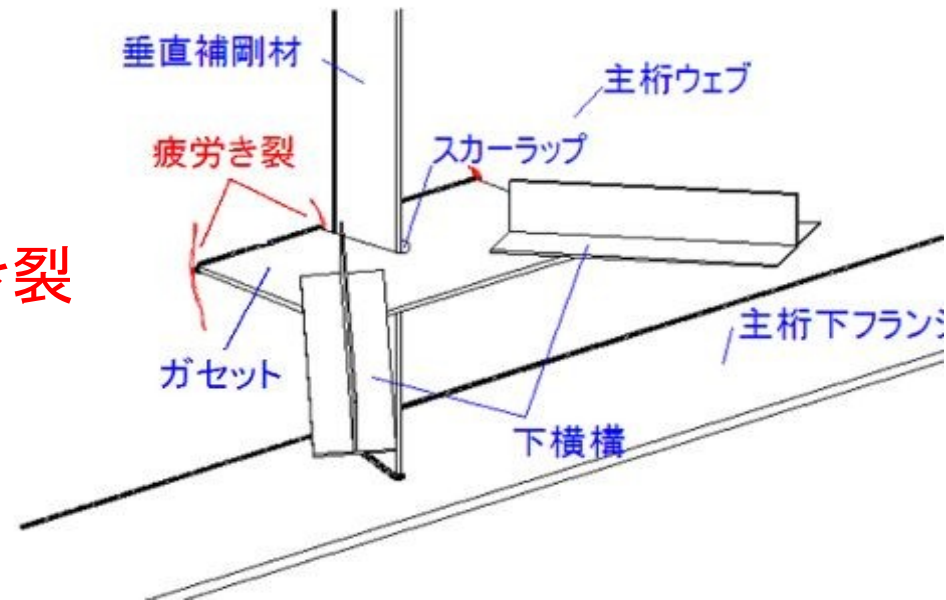
フレッチング

疲労強度は高力ボルト摩擦接合継手とほぼ同じ



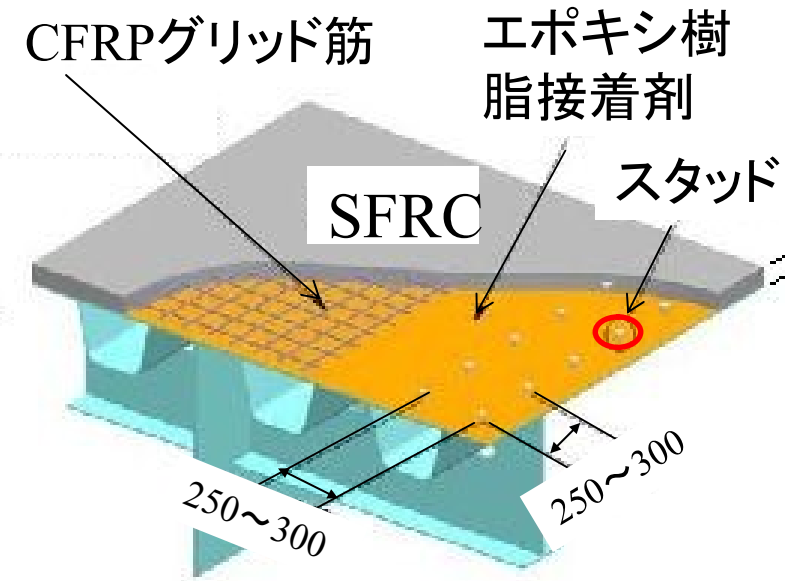
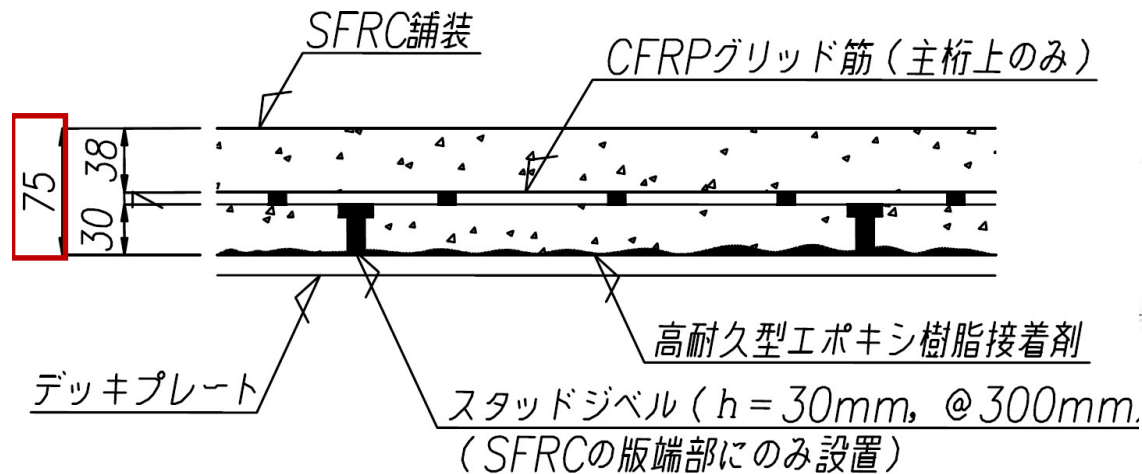
補修・補強

スカーラップ内の疲労き裂



面外曲げの軽減

SFRC舗装による鋼床版補強 (デッキプレートの変形の抑制)



水結合材比 W/(C+EX) (%)	細骨材率 (s/a) (%)	鋼繊維 混入量 (kg/m ³)	単位量 (kg/m ³)					AE減水剤 ((C+EX)×%) Ad
			水 W	セメント C	膨張材 EX	細骨材 S	粗骨材 G	
43.0	57.9	120	175	387	20	956	700	1.6

設計基準強度: 30N/mm²(材令7日)

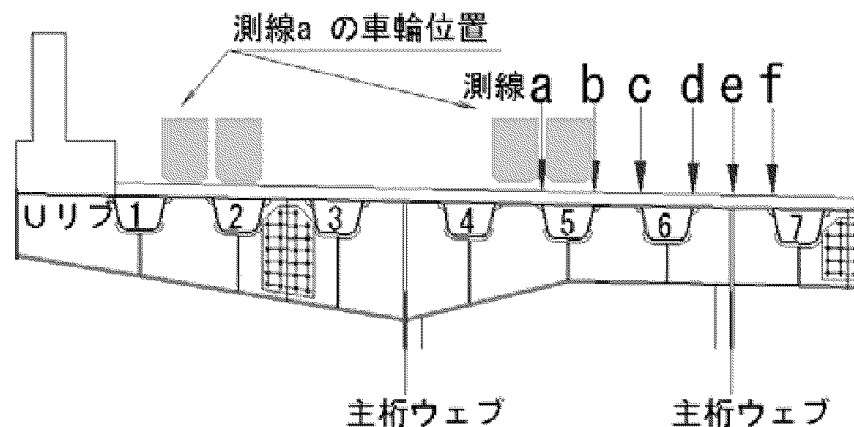
SFRC 舗装の現場施工



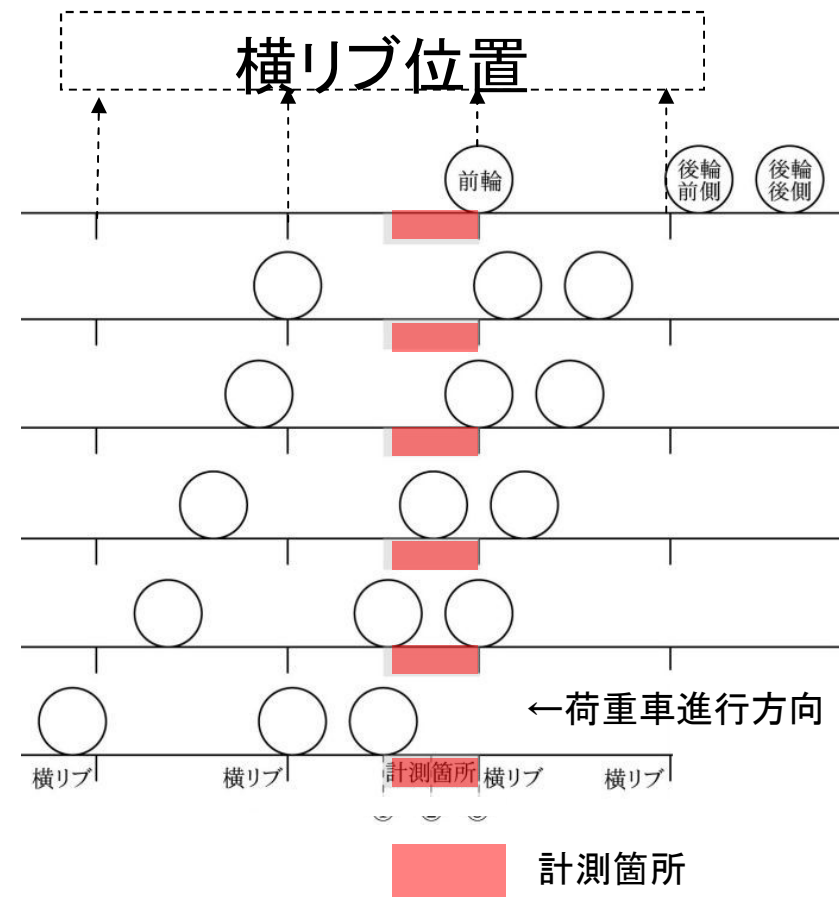
SFRC舗装による鋼床版補強

○補強効果確認

荷重車計測(総重量約222kN)



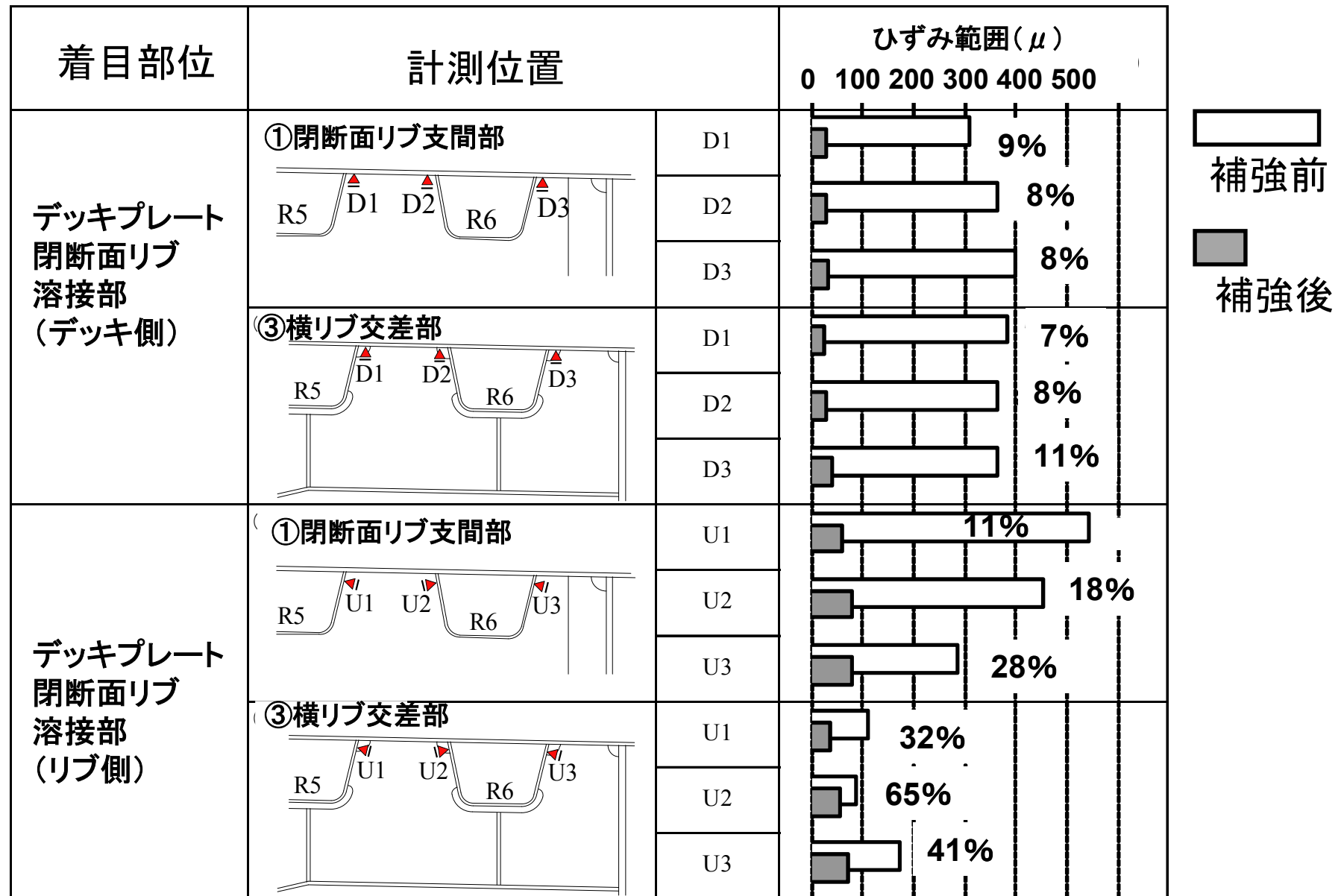
(a) 幅員方向載荷位置



(b) 橋軸方向載荷位置

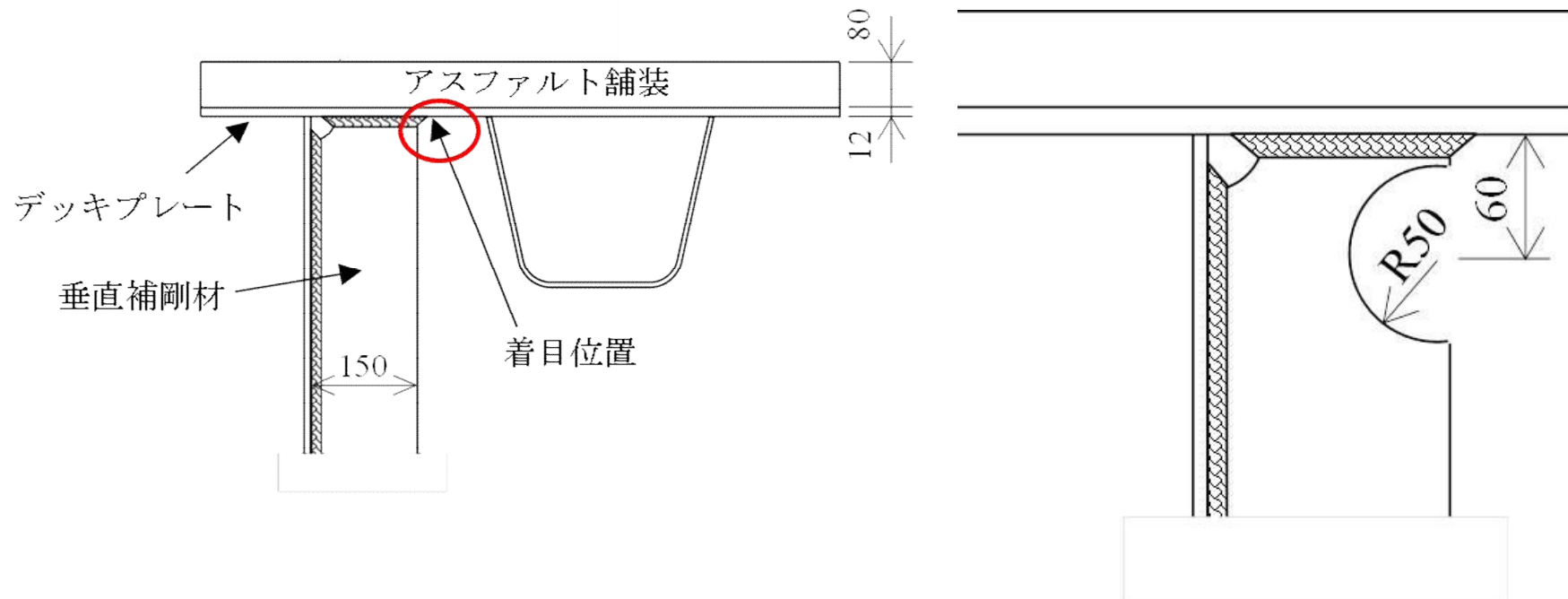
載荷状態の組合せの中での最大ひずみと最小ひずみの差をひずみ範囲として整理

SFRC舗装による鋼床版補強効果

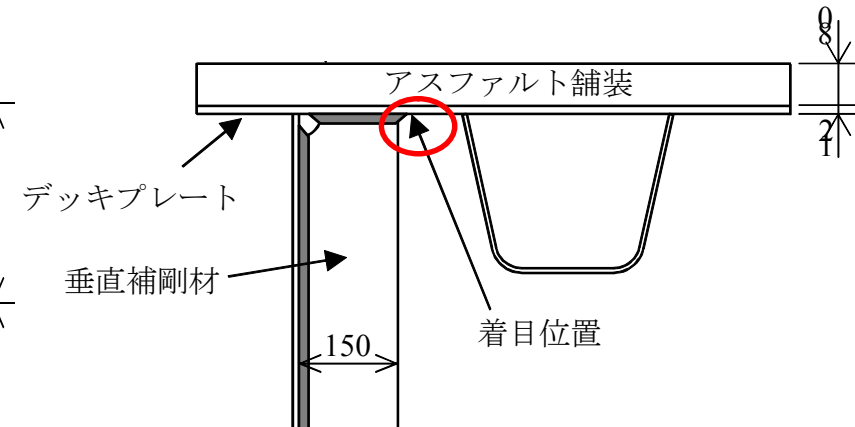
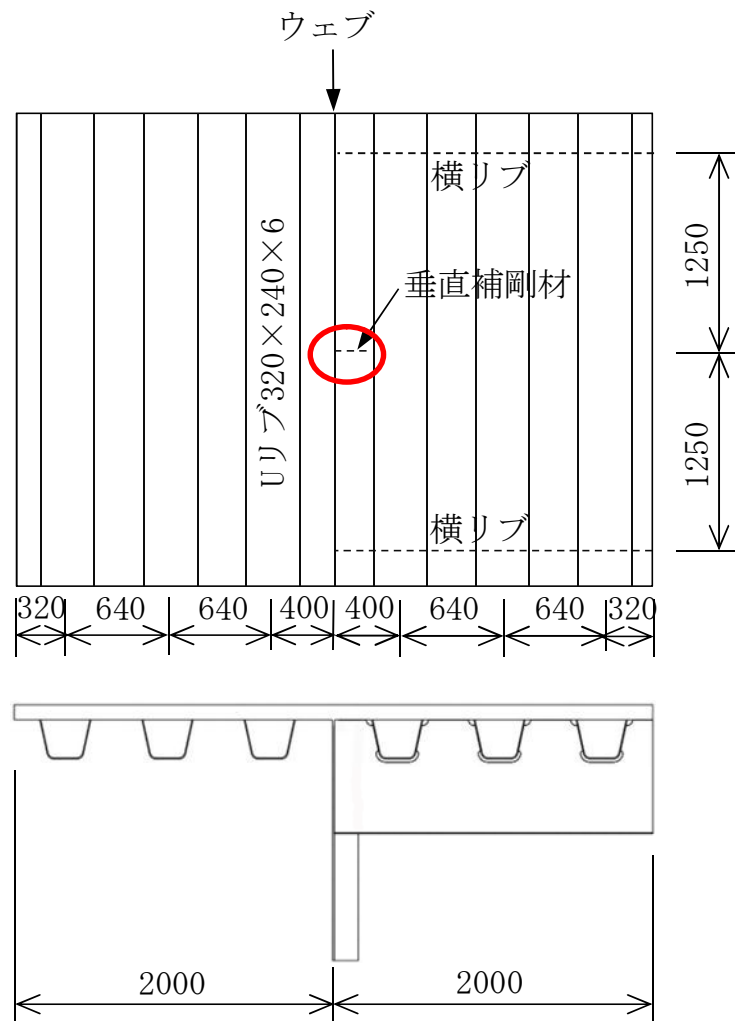


4. 補修・補強部の疲労耐久性評価(予防保全)

垂直補剛材上端と鋼床版デッキプレートとのすみ肉溶接継手



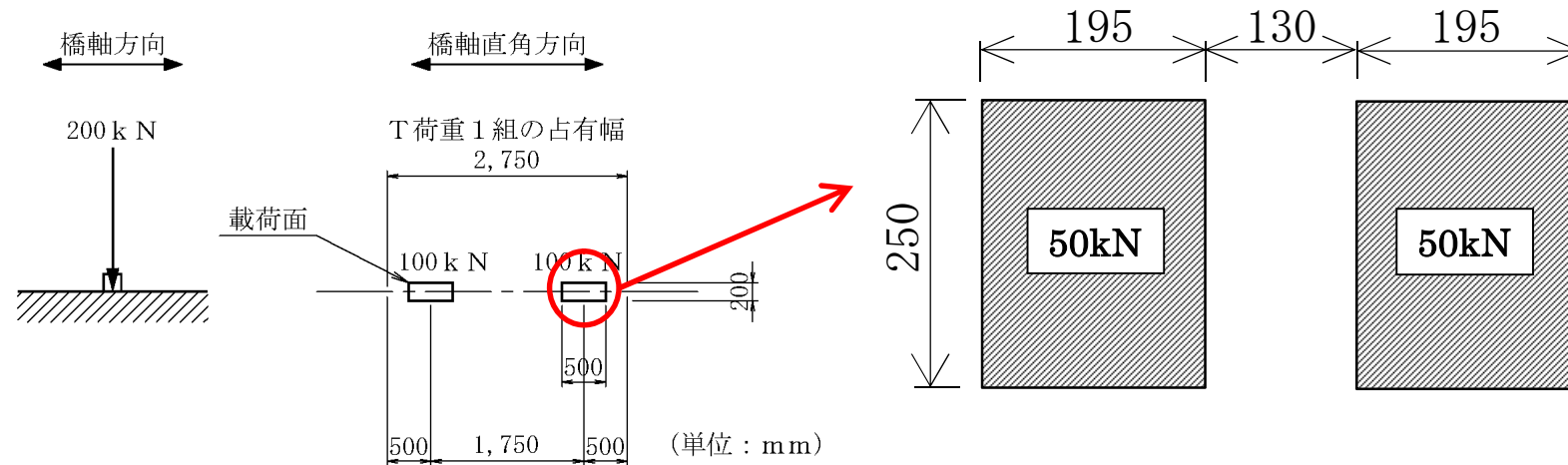
構造形式：鋼床版箱桁



疲労き裂の例

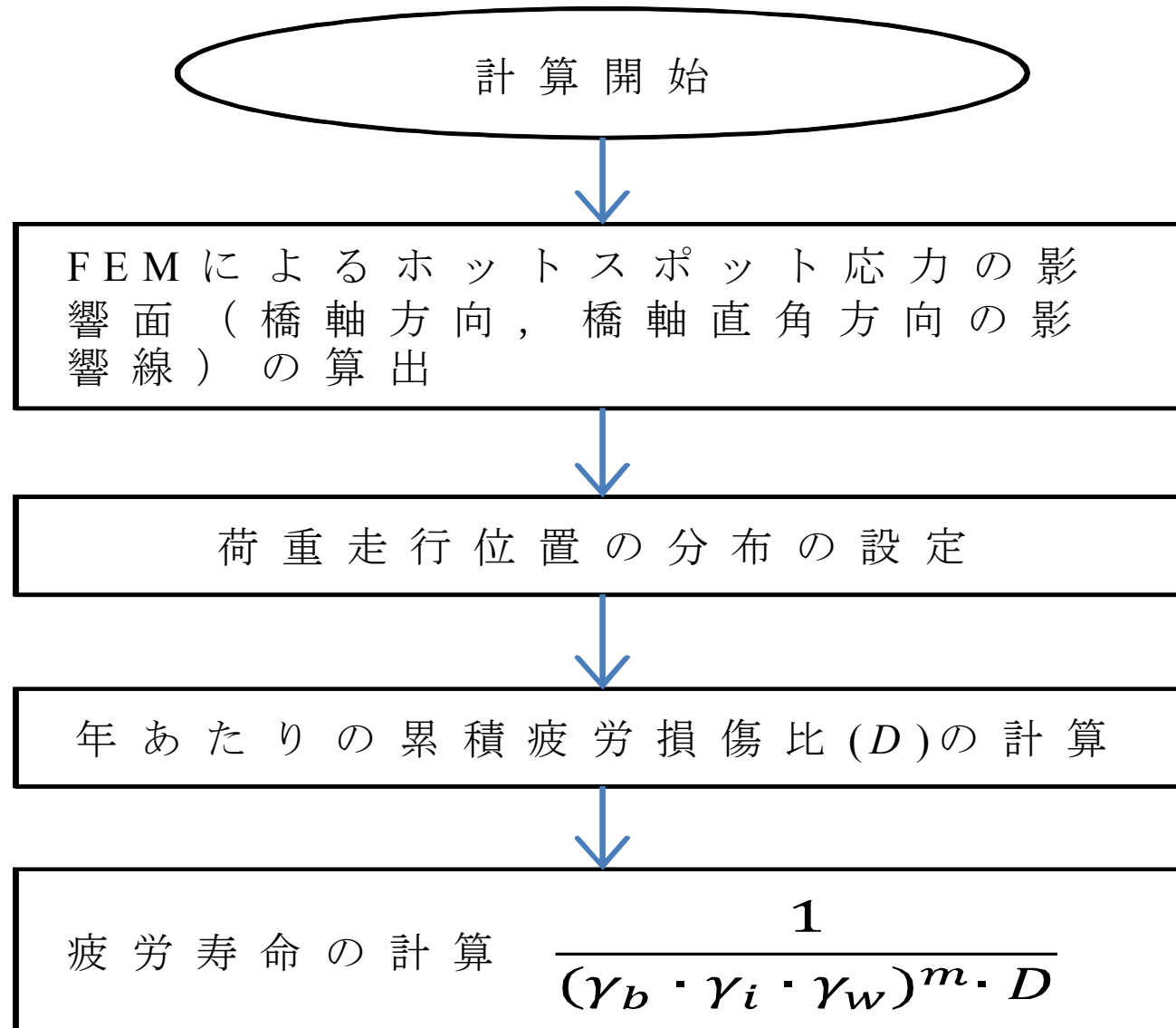
荷重

T荷重(道路橋示方書)の1輪(100kN)相当の荷重をダブルタイヤを模擬して載荷

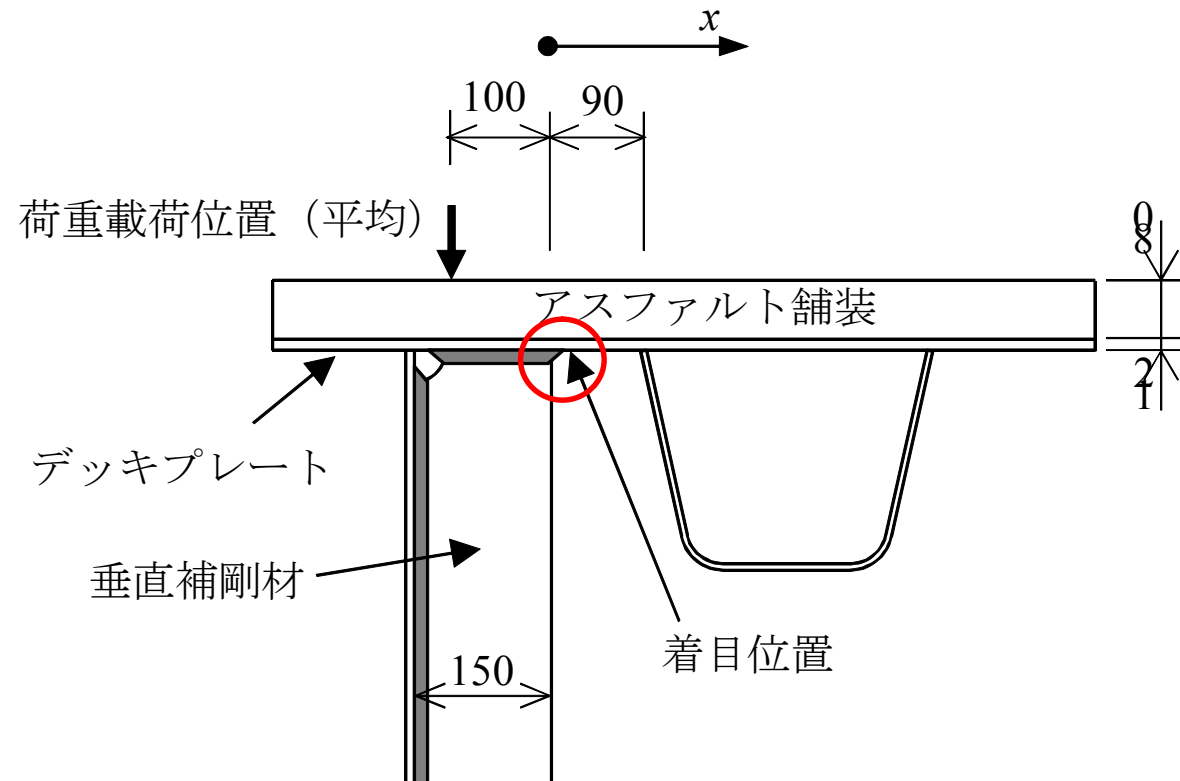


1方向1車線あたりの日大型車設計交通量: 1,500台

疲労評価の手順



評価位置及び疲労強度等級

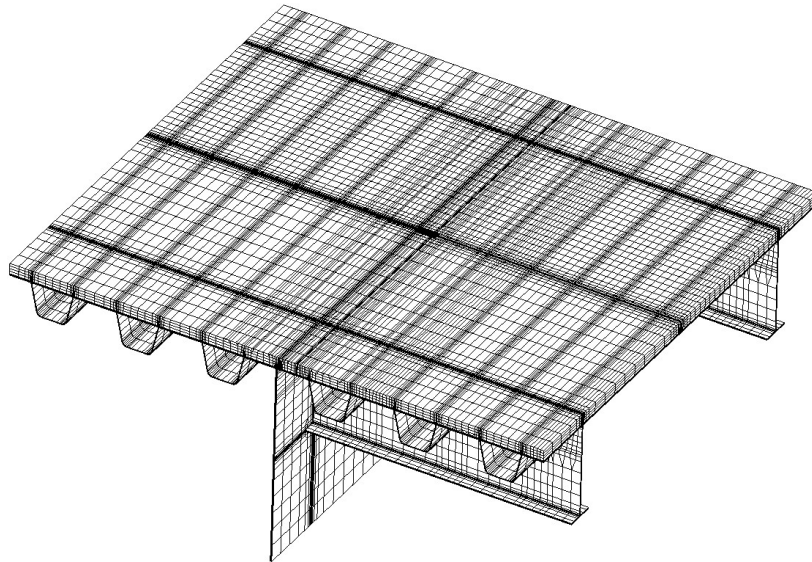


ホットスポット応力に対する疲労設計曲線

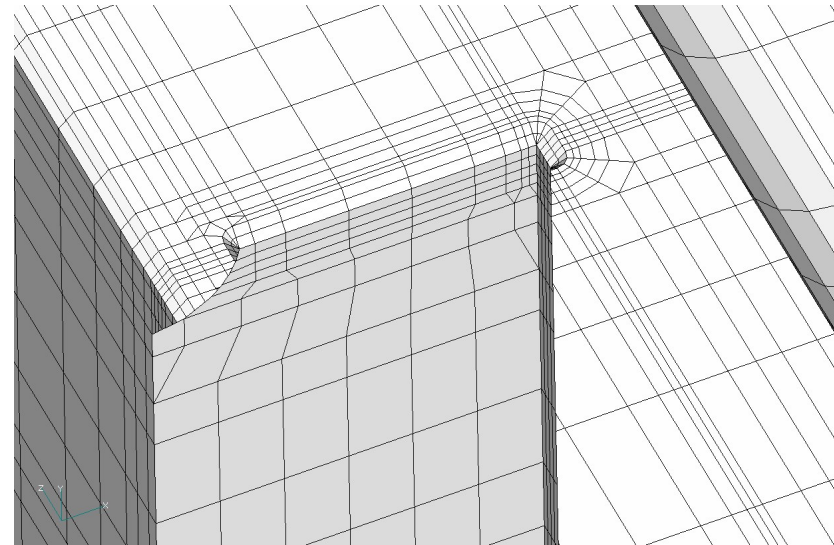
⇒E等級(200万回基準疲労強度: 80N/mm^2)

応力範囲の算定

解析モデル



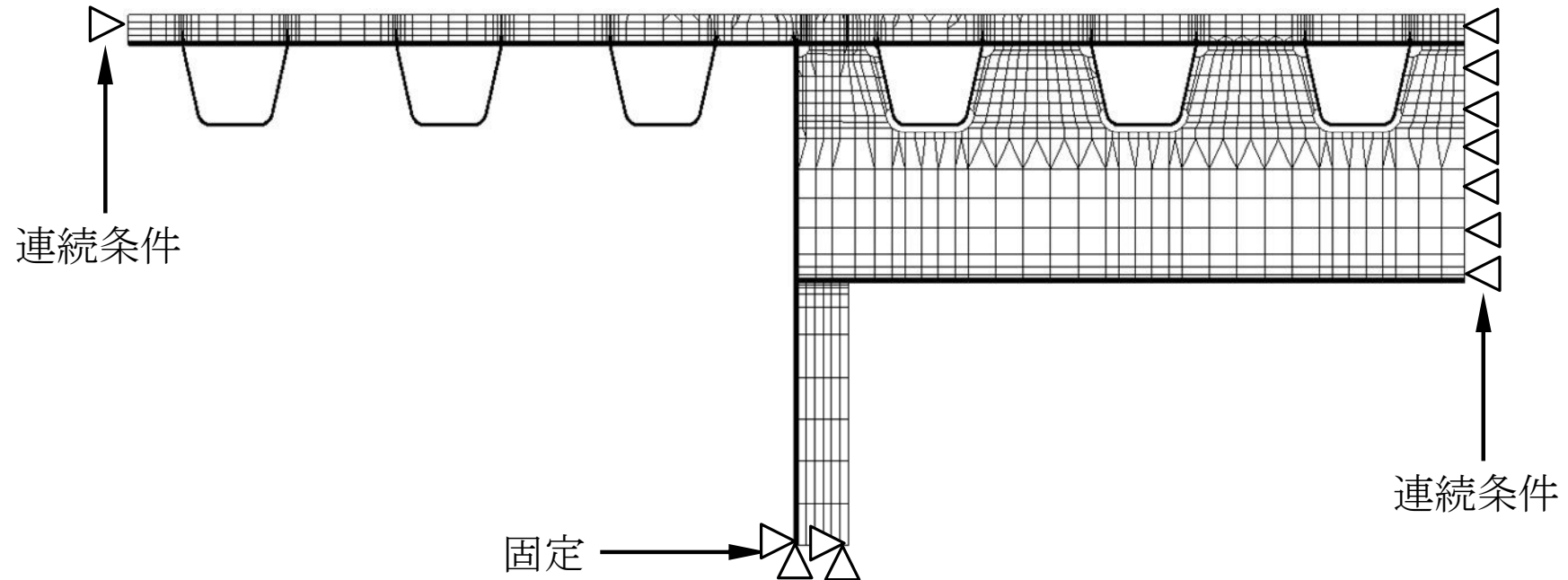
全体図



溶接継手部近傍

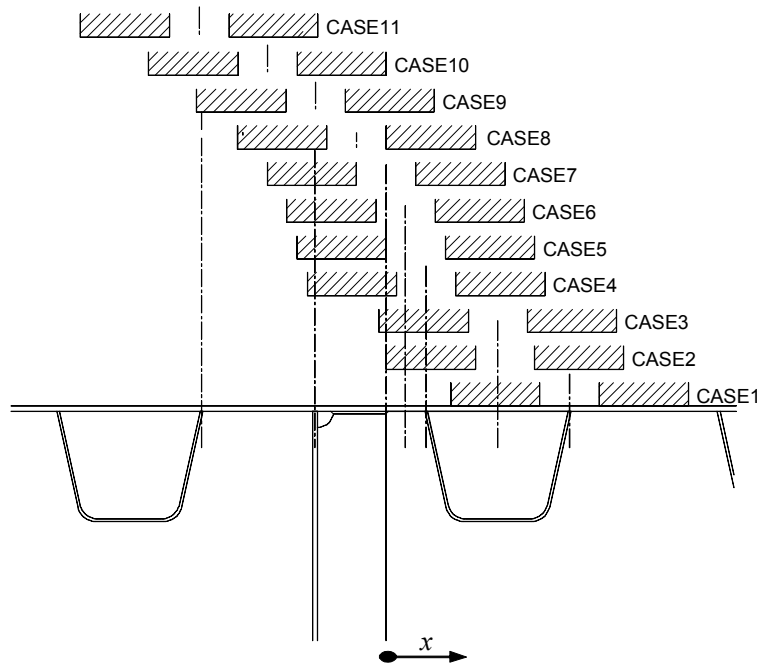
- ・解析コード: MSC NASTRAN 2008
- ・材料特性(線形弾性体)
 - 鋼 材 $E=2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu=0.3$
 - アスファルト $E=500$ (夏), 1500 (春秋), 5000 (冬) N/mm^2 , $\nu=0.35$
夏季:3カ月, 春秋:6カ月, 冬季:3カ月
- ・着目部近傍要素サイズ: $2.5\text{mm} \times 3\text{mm}$ 程度

境界条件

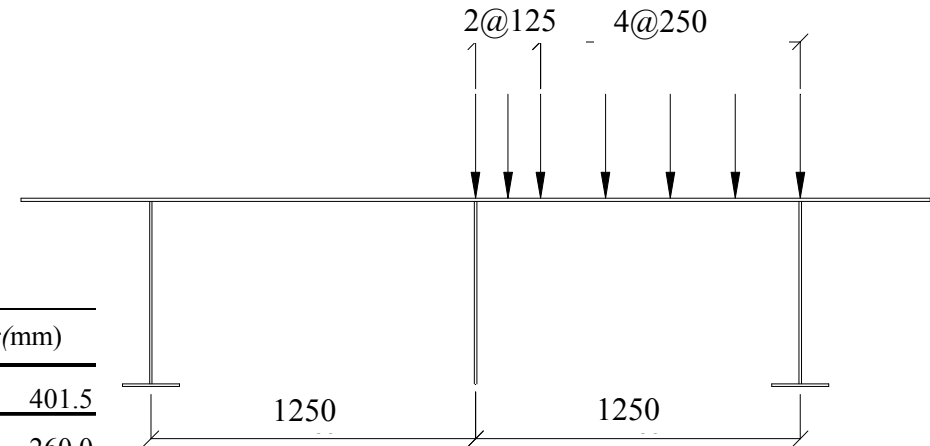


※隣接する荷重の影響，主桁系の影響は小さいと判断

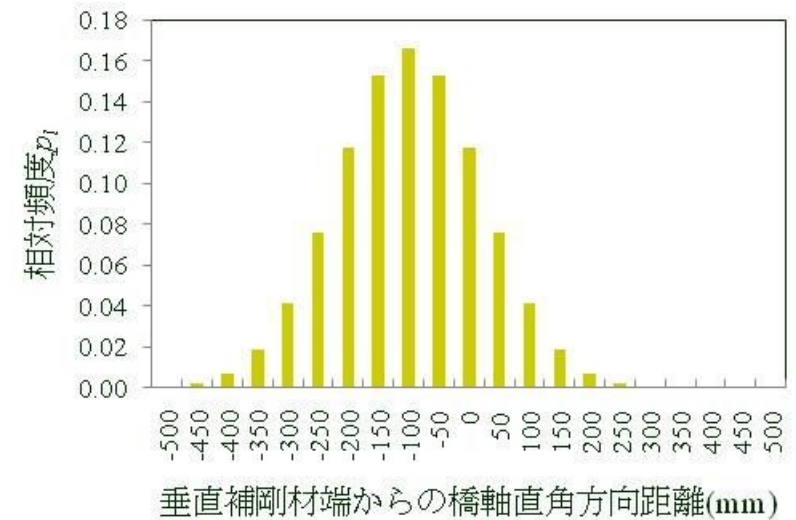
荷重条件



CASE	$x(\text{mm})$
1	401.5
2	260.0
3	244.5
4	87.5
5	64.9
6	42.3
7	0.0
8	-65.0
9	-155.5
10	-281.0
11	-404.0

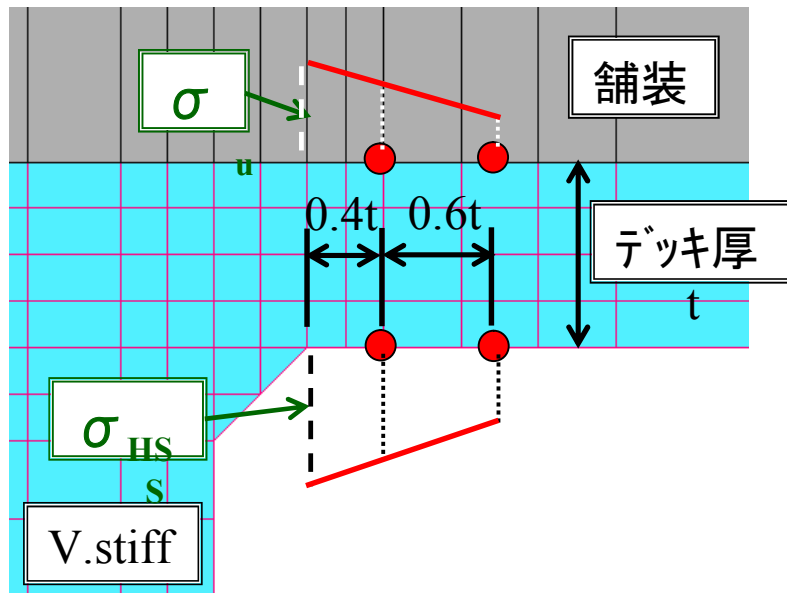


橋軸方向:7ケース



橋軸直角方向:11ケース,標準偏差120mmの正規分布を仮定

ホットスポット応力の算定法



$$\sigma_m = \frac{\sigma_{HSS} + \sigma_u}{2}, \quad \sigma_b = \frac{\sigma_{HSS} - \sigma_u}{2}$$

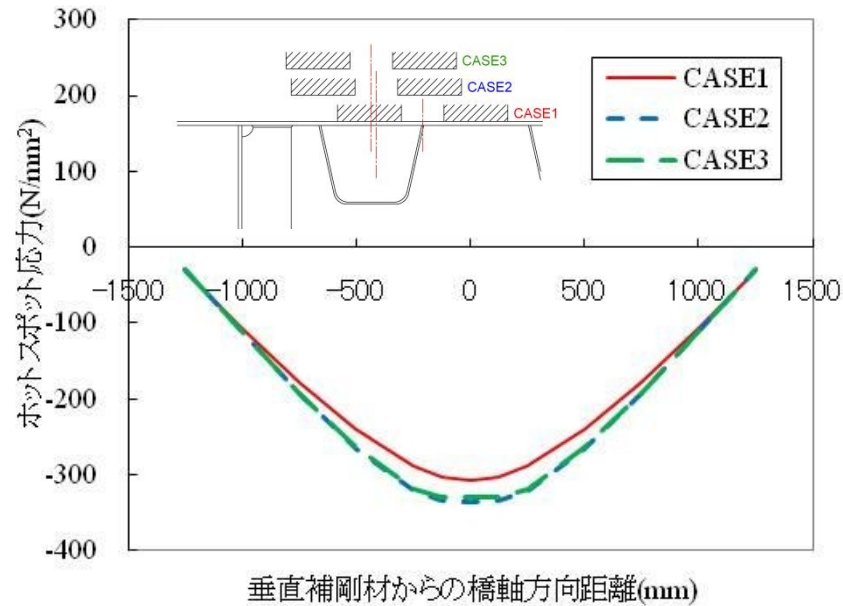
σ_m : 膜応力, σ_b : 面外曲げ応力

板曲げ応力の補正

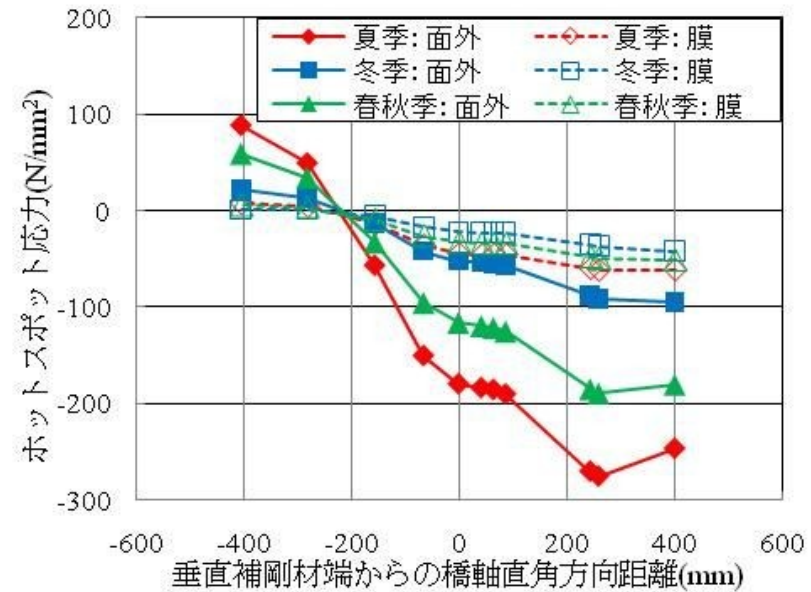
$$1.2[\Delta \sigma_m + (4/5) \Delta \sigma_b]$$

板曲げ応力を受ける場合には軸方向応力を受ける場合よりも疲労強度が高い

応力解析結果



橋軸方向の影響線(夏季)



橋軸直角方向の影響線

- ・影響線の基線長は短い
- ・圧縮応力が卓越
- ・冬季は夏季よりも30%程度緩和
- ・面外曲げ応力が支配的

疲労寿命評価

1日あたりの
累積疲労損傷比

$$D = \frac{ADTT \cdot \sum (\Delta \sigma_i^m \cdot p_i)}{2 \times 10^6 \cdot \Delta \sigma_f^m \cdot (C_R \cdot C_t)^m}$$

ADTT: 1車線あたりの日大型車設計交通量=1500台

m: 疲労設計の曲線の傾きを表す係数=3

$\Delta \sigma_i$: 橋直方向位置iを走行した際の応力範囲
 $= 1.2 \{ \Delta \sigma_m + (4/5) \Delta \sigma_b \}$ (衝撃係数 $i_f=0.2$)

p_i : 橋直方向位置iを通過する相対頻度

$\Delta \sigma_f$: 200万回疲労強度=80N/mm²(E等級)

C_R : 平均応力の補正係数=1.3※

C_t : 板厚の補正係数=1.0

※簡単のため。一部、引張も出るが、死荷重は圧縮に作用？ 平均応力の影響

疲労寿命評価

1日当たりの累積疲労損傷比

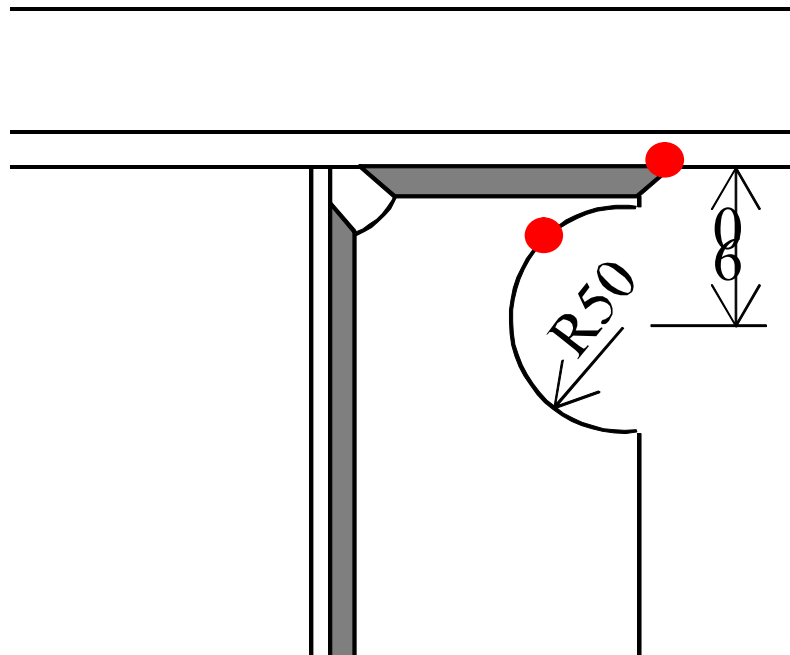
	$\sum_i \Delta\sigma_i^3 p_i$	ADTT	C_0	$D (/day)$
夏季	6.053×10^6	1,500	2.25×10^{12}	0.00404
冬季	1.786×10^5			0.00012
春秋季	1.429×10^6			0.00095

- ・季節の影響（春夏秋冬の日数の割合が1/4ずつ）

$$365 \times \left(\frac{0.00404}{4} + \frac{0.00012}{4} + 2 \times \frac{0.00095}{4} \right) = 0.553$$

疲労寿命は $1/0.533=1.8$ 年

半円孔による補修・補強



実橋に適用された補修例



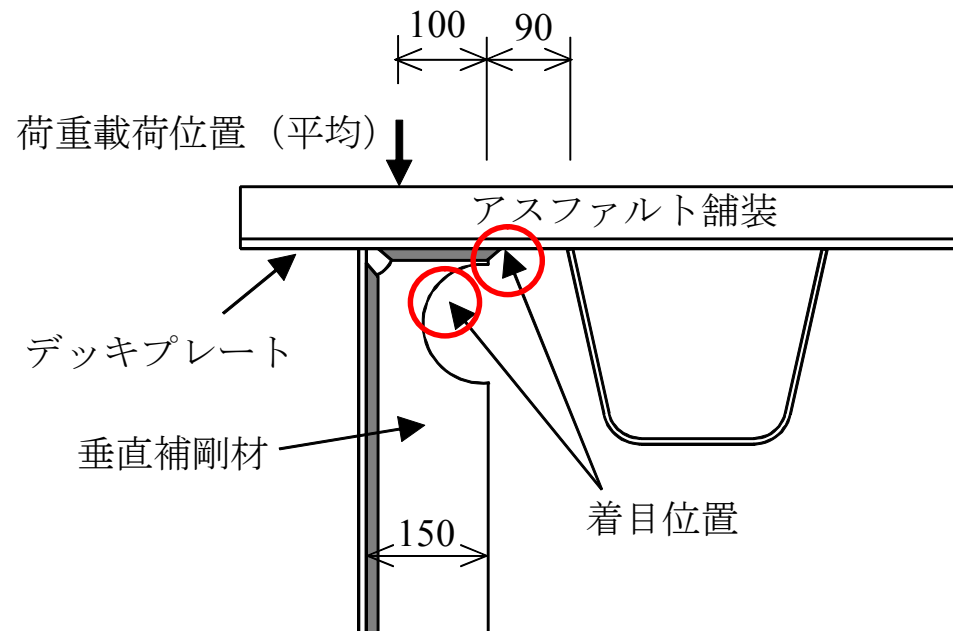
ドリルにより穿孔し、孔壁表面は滑らかに仕上げる

想定される疲労破壊起点

溶接止端＋円孔縁

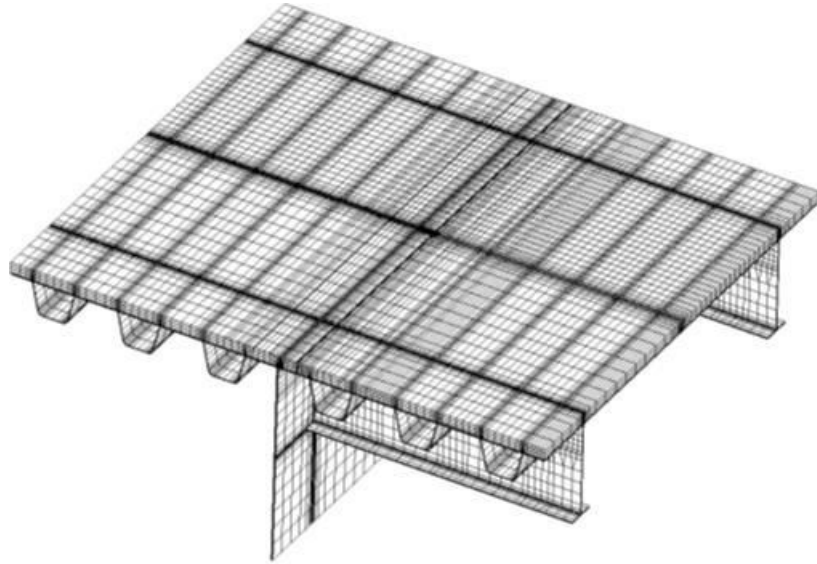
補修・補強後の構造に対する疲労寿命評価

評価位置及び疲労強度等級

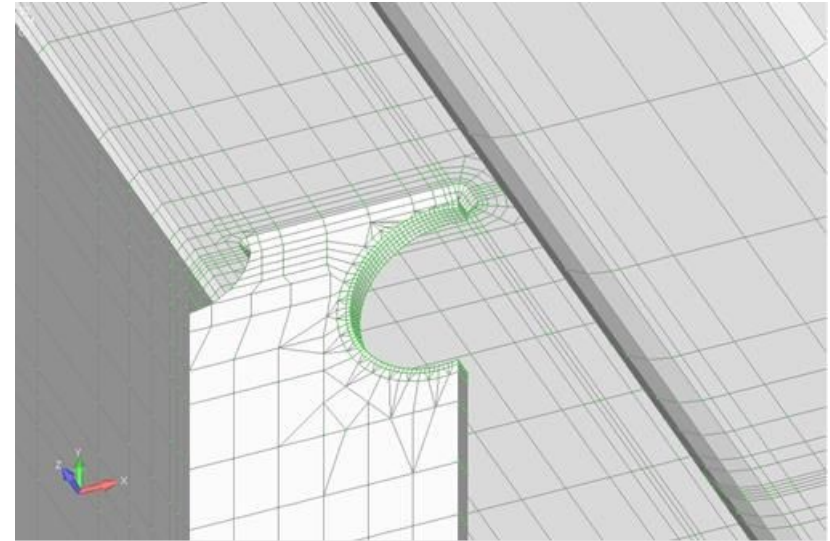


溶接止端部:E等級(80) ホットスポット応力
半円孔縁:A等級(190) 最大応力

解析方法



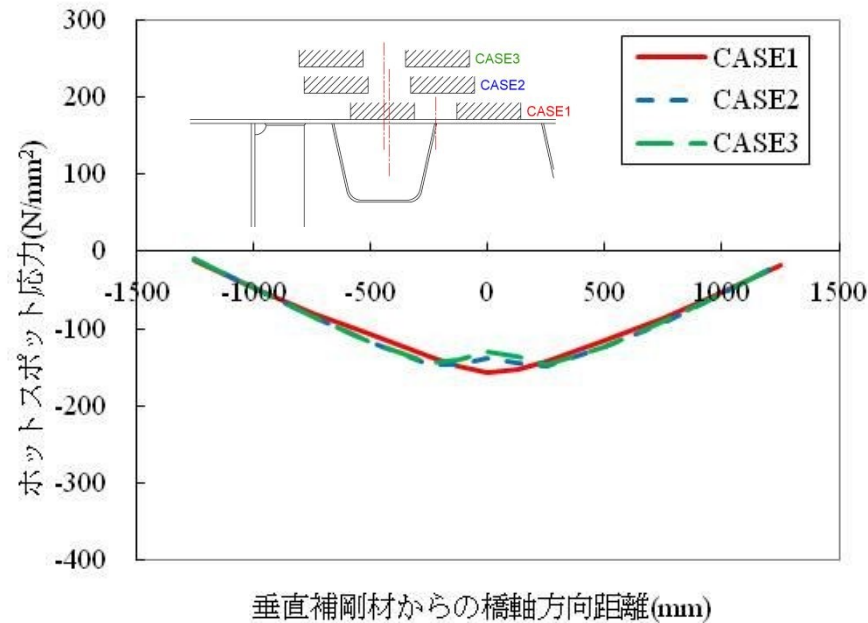
全体図



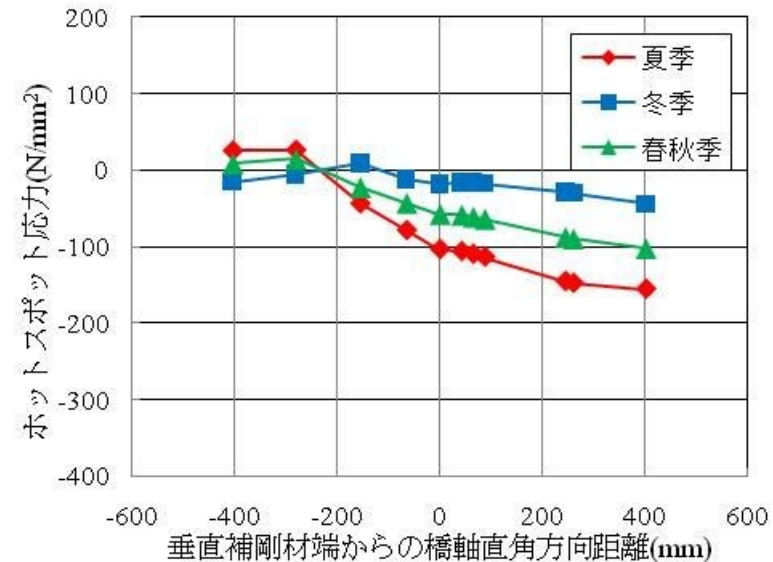
半円孔部近傍

※解析条件、ホットスポット応力の求め方は
補修・補強前構造と同じ

溶接止端部のホットスポット応力



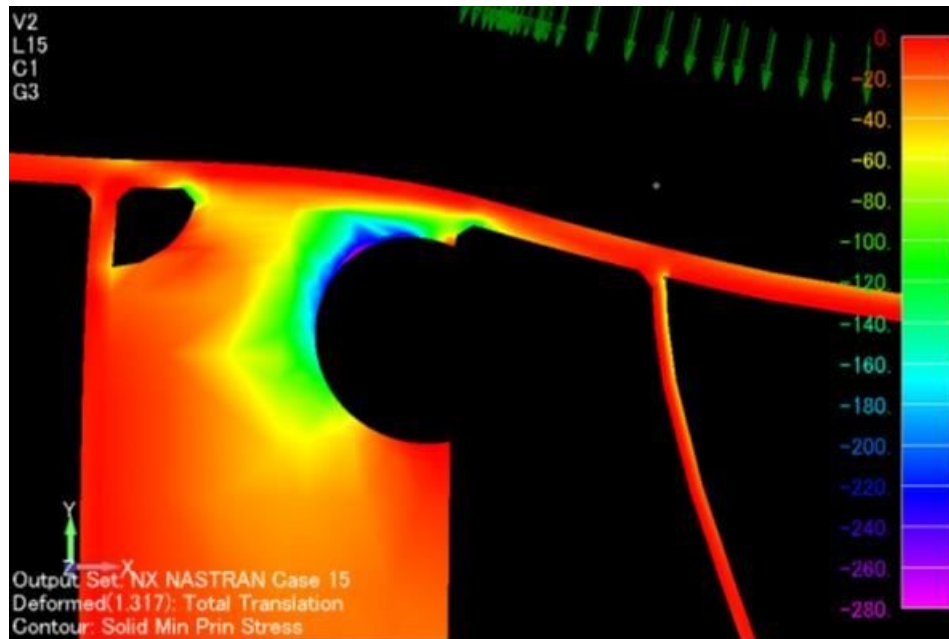
橋軸方向の影響線(夏季)



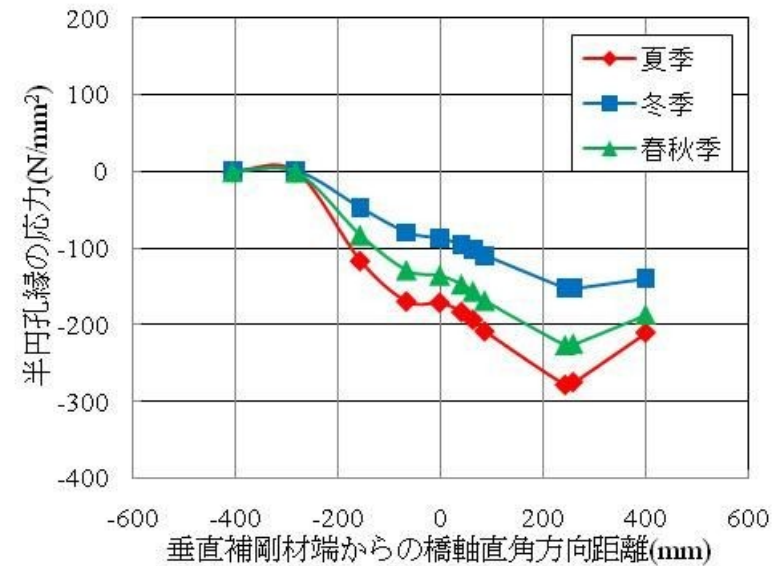
橋軸直角方向の影響線

- ・補修により発生応力は半減
- ・面外曲げは小さくなるが、膜応力への低減効果小

半円孔縁の応力



最小の最小主応力発生時コンター図



橋軸直角方向の影響線

- ・最大で -279N/mm^2 の応力が発生
- ・止端部と比較して季節による割合の差は小さい

疲労寿命評価

溶接止端部

1日当たりの累積疲労損傷比

	$\sum_i \Delta\sigma_i^3 p_i$	ADTT	C_0	$D (/day)$
夏季	5.752×10^6	1,500	2.25×10^{12}	0.000383
冬季	2.655×10^3			0.000002
春秋季	8.016×10^4			0.000053

- ・季節の影響（春夏秋冬の日数の割合が1/4ずつ）

$$365 \times \left(\frac{0.000383}{4} + \frac{0.000002}{4} + 2 \times \frac{0.000053}{4} \right) = 0.0448$$

疲労寿命は $1/0.0448 = 22.3$ 年

疲労寿命評価

半円孔縁

1日当たりの累積疲労損傷比

	$\sum_i \Delta\sigma_i^3 p_i$	ADTT	C_0	$D (/day)$
夏季	6.461×10^6	1,500	3.01×10^{13}	0.000322
冬季	6.247×10^5			0.000032
春秋季	2.429×10^6			0.000121

- ・季節の影響（春夏秋冬の日数の割合が1/4ずつ）

$$365 \times \left(\frac{0.000322}{4} + \frac{0.000032}{4} + 2 \times \frac{0.000121}{4} \right) = 0.0543$$

疲労寿命は $1/0.0543 = 18.4$ 年

止端部22.3年

今後の課題と期待

- (1) 新しい疲労強度改善法の開発
応力集中の緩和、残留応力の調整
疲労に強い鋼材の開発
- (2) 疲労強度改善方法・改善部の品質保証方法の確立
- (3) 最新の知識に基づいた疲労設計法の再構築(新JSSC指針)
- (4) 疲労損傷の補修方法と補修部材の強度・寿命評価法の確立
- (5) 効率的な維持管理体制の構築
- (6) 疲労に対する関心の向上・知識の習得

安心して使えるように、橋を作り、守る

仕様設計ではない、鋼床版の疲労設計法の確立