

「CAESARの5年間の活動及び今後の取り組み」 鋼橋の劣化損傷と技術開発

独立行政法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR

上席研究員 村越 潤

報告内容

1. はじめに — 鋼橋の損傷事例と課題 —
2. 鋼床版の疲労への対応
3. 鋼 I 桁橋の疲労への対応
4. トラス橋の主構部材の腐食への対応
5. おわりに — 今後の研究開発の取り組み —

鋼橋の損傷事例と課題

○鋼橋の主な劣化損傷は、**腐食と疲労**

- ・急速な高齢化に伴い、劣化損傷の著しい事例の増加
- ・目視点検だけでは診断困難な損傷事例の増加
- ・構造形式・発生部位により影響度も対処法も大きく異なる。

点検、診断、対策の技術開発が必要な事例

(1) 橋全体系の致命的損傷に至るおそれのある重大損傷

- ・トラス主構の腐食による耐荷力低下
- ・桁橋の主桁の疲労による部分破断
- ・吊橋等のケーブル定着部の腐食等による破断

(2) 損傷原因、対応方法の知見の充実が必要

- ・鋼部材の疲労全般

(第三者被害)

- ・鋼床版のデッキ進展き裂
- ・RC床版の疲労以外の要因も含めた複合的な劣化損傷

(3) 現場条件に応じた対策技術の充実、標準化が必要な事例

(各種制約条件下での信頼性の高い、合理的な対策)

- ・桁端部の腐食による耐荷力低下 等

鋼橋の損傷事例と課題

○鋼橋の主な劣化損傷は、**腐食と疲労**

- ・急速な高齢化に伴い、劣化損傷の著しい事例の増加
- ・目視点検だけでは診断困難な損傷事例の増加
- ・構造形式・発生部位により影響度も対処法も大きく異なる。

点検、診断、対策の技術開発が必要な事例

(1) 橋全体系の致命的損傷に至るおそれのある重大損傷

- ・**トラス主構の腐食**による耐荷力低下
- ・桁橋の**主桁の疲労**による部分破断
- ・吊橋等のケーブル定着部の腐食等による破断

(2) 損傷原因、対応方法の知見の充実が必要

- ・鋼部材の疲労全般

(第三者被害)

- ・**鋼床版のデッキ進展き裂**
- ・RC床版の疲労以外の要因も含めた複合的な劣化損傷

(3) 現場条件に応じた対策技術の充実、標準化が必要な事例

(各種制約条件下での信頼性の高い、合理的な対策)

- ・桁端部の腐食による耐荷力低下 等

⇒**維持管理の信頼性向上、負担軽減のための技術開発の必要性**
(技術の体系化、要素技術の開発)

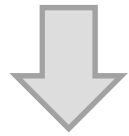
鋼床版の疲労への対応

※詳細については、臨床研究パンフレット中の参考文献、CAESARのHP公表の報告書を参照

鋼橋の疲労損傷事例の変遷

○道路橋では1980年頃より報告事例あり。

特殊な形式・構造部位



ランガー吊材(風による振動)、
桁端円弧状切欠き部 等

一般的な構造部位(二次応力、事例の増加)



主桁と横桁の接合部、下路アーチ垂直材の接合部
支承ソールプレート溶接部 等
(設計上のモデル化と実挙動との違い)

主構造本体、要因複雑(溶接品質の影響)



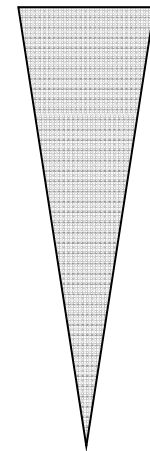
鋼製橋脚 ←H14道示:疲労設計導入

(影響大。応力が小さくても内部欠陥より発生)

Uリブ鋼床版(疲労の影響の受けやすい部位)
←H24道示:疲労設計規定化

主桁の疲労設計対象部位

原因・対策
明確

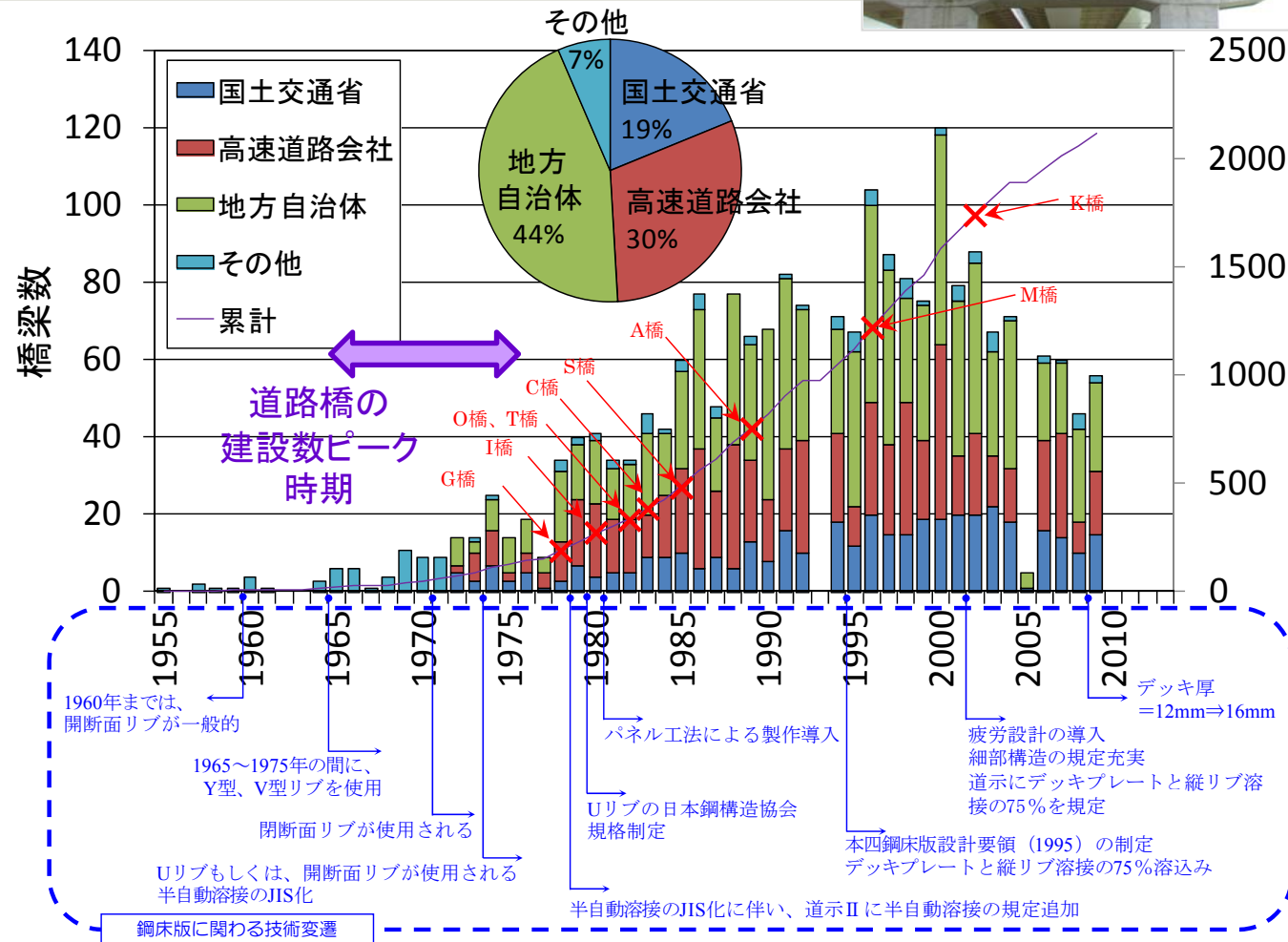


原因複雑
対策の難しさ

疲労設計
対象部位

鋼床版の概要と建設年次

- デッキを縦リブ・横リブで溶接により補剛した構造
- 軽量のため、長大橋や都市内高架橋に広く適用
- 床版として輪荷重を直接支持
⇒疲労の影響を受けやすい構造



鋼床版の疲労への取組み

- 各部位のき裂に対して原因究明、対策工法を検討
- 影響度の大きいき裂(デッキ進展き裂)を優先

＜デッキ進展き裂の課題＞

(1) 設計・施工上の問題点が不明

⇒**損傷原因解明、耐久性向上策**

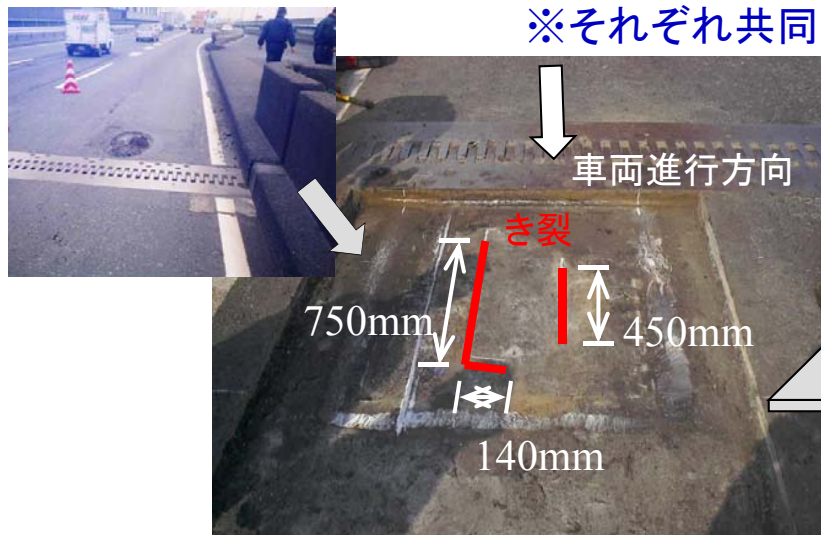
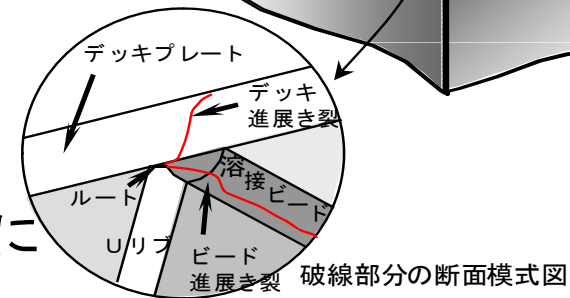
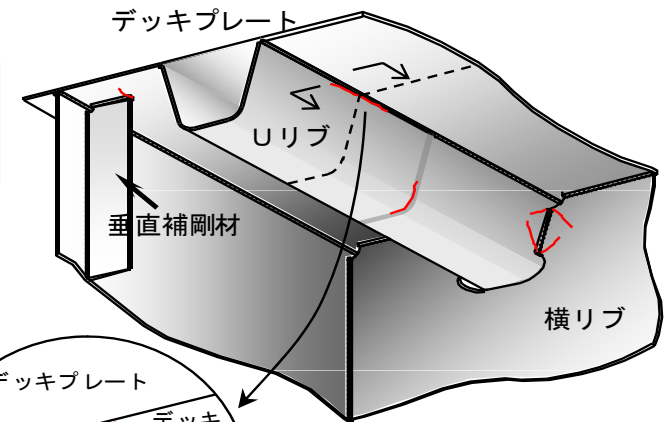
(2) き裂は、目視点検では検出困難

⇒**非破壊検査技術による調査法**

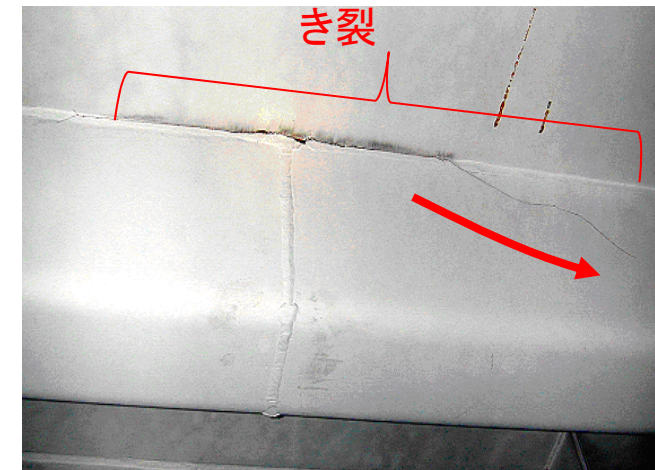
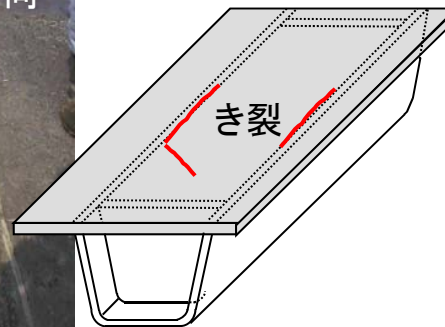
(3) き裂進展時には路面陥没による第3者被害に

⇒**補修・補強方法、予防保全策**

※それぞれ共同研究を実施



舗装下に貫通したき裂(デッキ進展き裂)



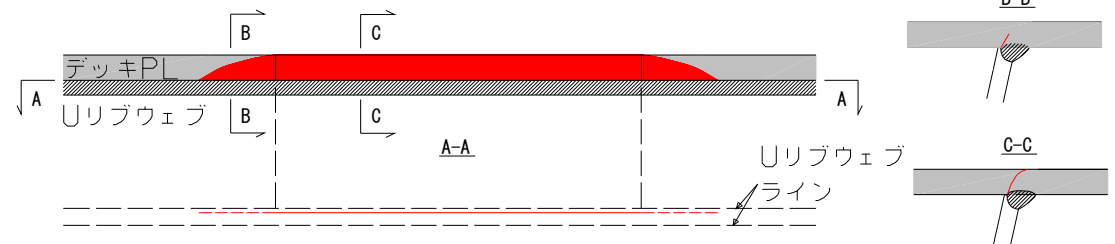
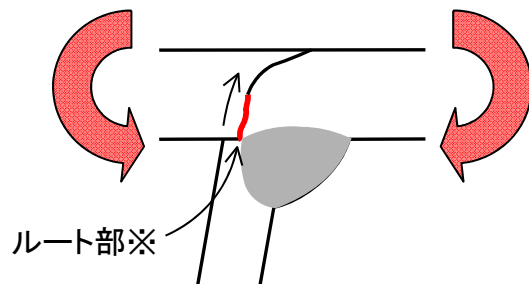
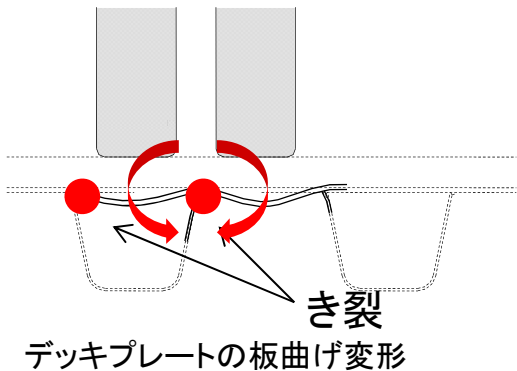
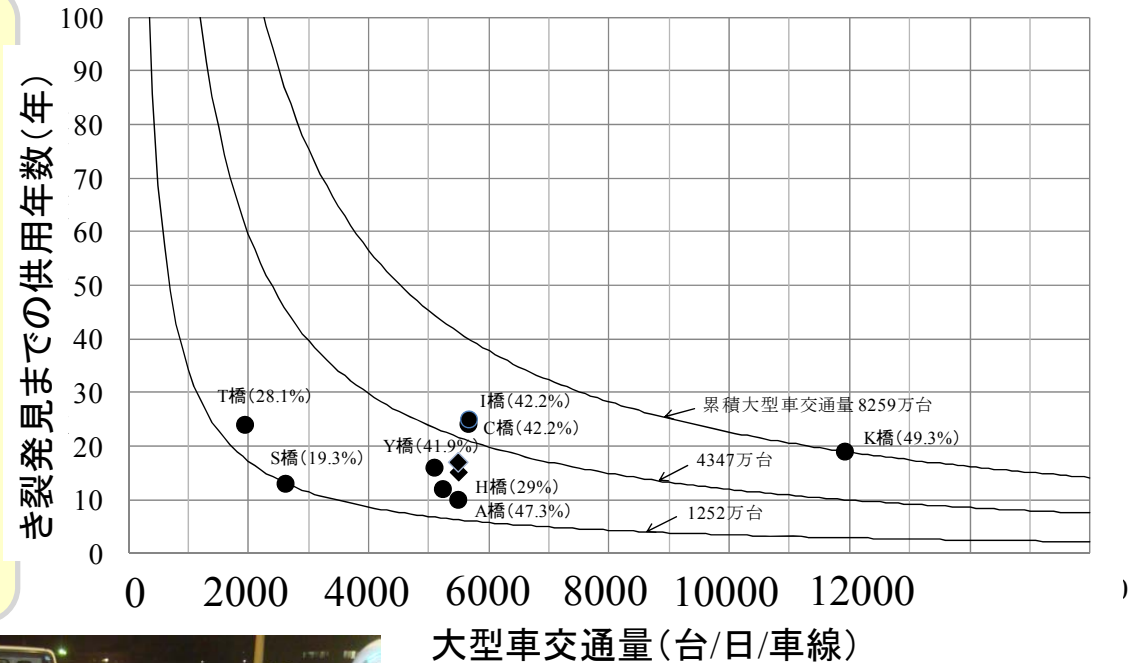
溶接に沿って長く進展したき裂(ビード進展き裂)

デッキ進展き裂の発生傾向

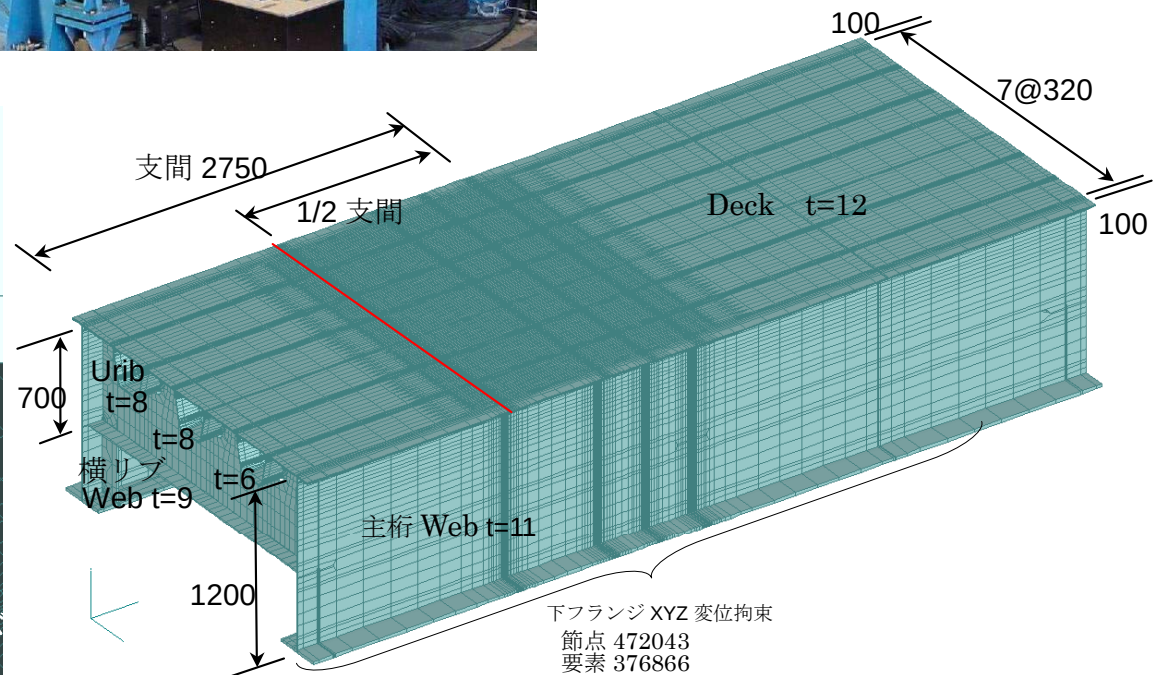
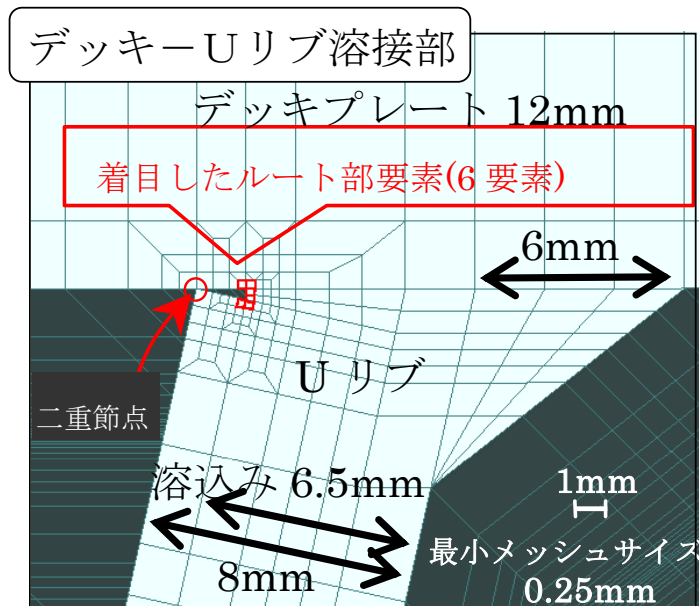
○供用から10～30年程度で発生
(累積大型車交通量では1200(万台/車線)
程度以上)

○損傷箇所は輪荷重が常時載
荷される位置直下の溶接部
(概ね大型のダブルタイヤが跨ぐ位置)

○損傷箇所はデッキ厚12mm
構造諸元との関係は不明確



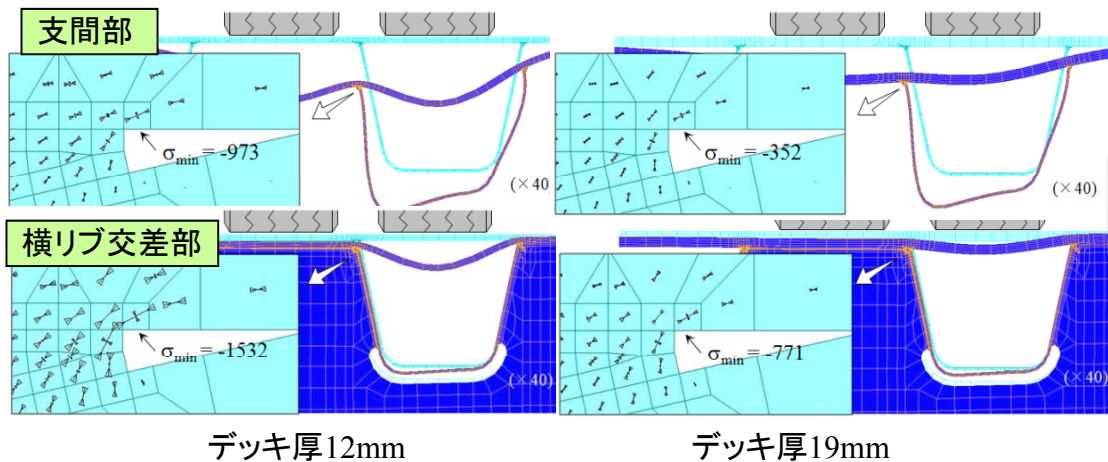
輪荷重走行試験とFEMによる局部応力性状の検討



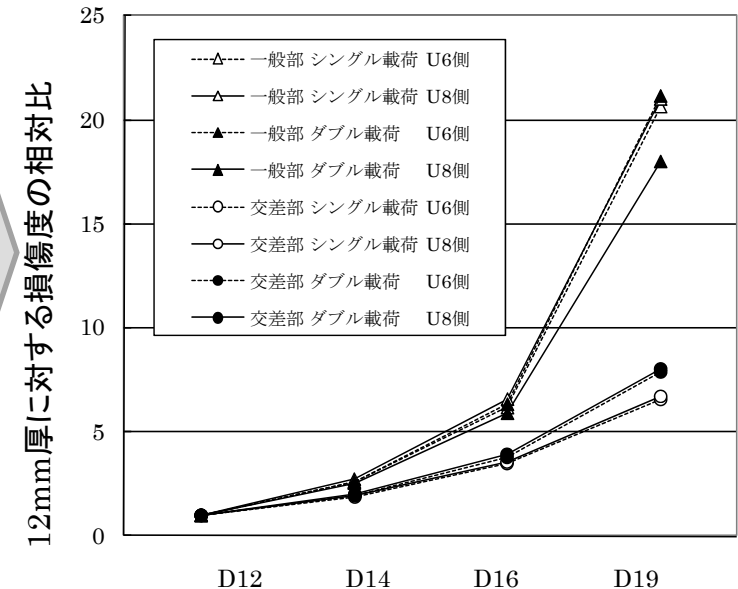
新設鋼床版の耐久性向上策 ―デッキ厚板化―

※国総研、橋建協と共同研究

- デッキ厚板化による応力軽減効果やき裂進展の遅延効果を確認
- 疲労耐久性を確保するためにデッキ厚を12mmから16mmに増厚(H21事務連絡、H24道示)

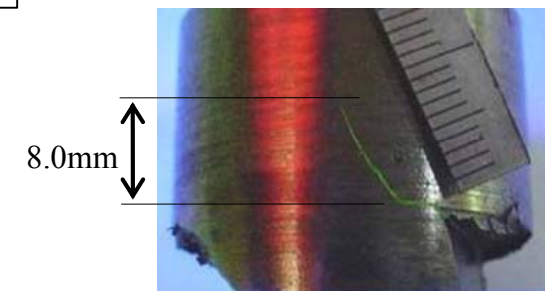
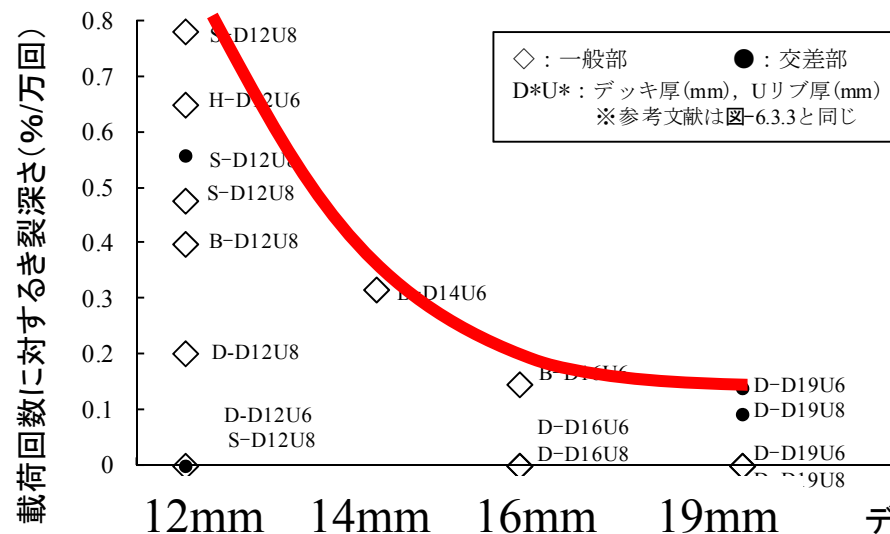


＜デッキ厚を変えた場合の変形図と主応力＞



＜デッキ厚別の損傷度の比較＞

＜デッキ厚とき裂の進展性状の関係＞



実験で再現されたき裂

疲労き裂の非破壊検査技術

■超音波探傷法の適用上の留意点

- 超音波や探触子の種類により探傷方法は様々
- 利用目的に応じたカスタマイズが必要
- 一方では検出性能も明確に示せる知見はない。

■要求性能

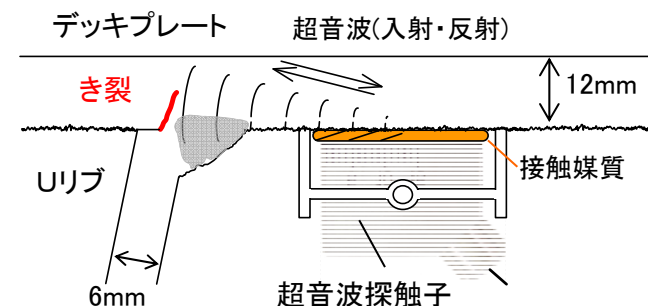
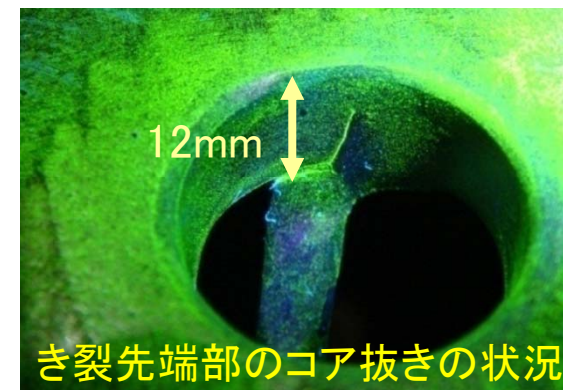
き裂の小さい段階から(精度の確保)、
見逃し・誤検出することなく(信頼性の確保)
検出可能

○深さ 3 mm程度のき裂の検出性能の確保

- ※深さ2mm程度までのき裂を他の反射源との識別は困難
- ※SFRC舗装施工後では内在き裂(7mm程度)は進展しない
という試験報告。深さ3mmは対処可能なき裂と仮定

○現場作業性の確保

- ・塗膜を除去せずに、塗膜上から探傷可能
- ・デッキプレートの下面側から比較的簡易に探傷可能



<超音波探触子によるき裂検出模式図>

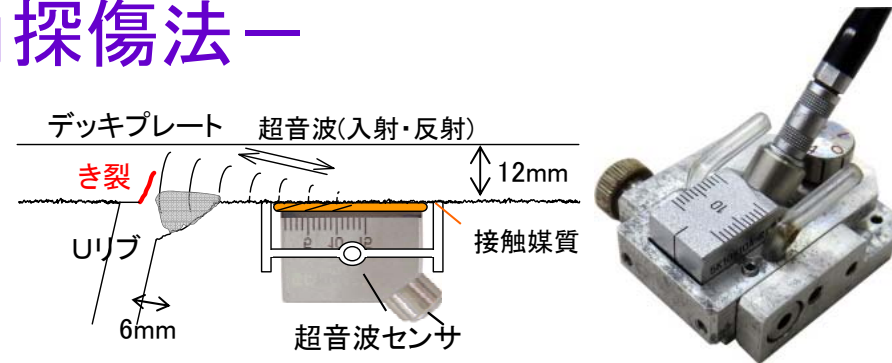


疲労き裂の非破壊検査技術

※菱電湘南エレクトロニクス(株)および三菱電機(株)と共同研究

ー臨界屈折角探傷法ー

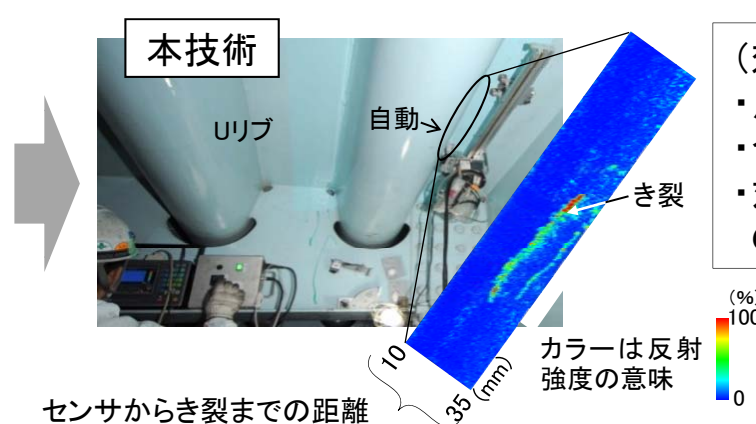
- 初期のき裂の検出可能な技術を開発
- 5橋で試行し、調査のための超音波探傷マニュアル案をとりまとめ
- 11橋での調査に適用。
⇒き裂の深さ計測のさらなる精度の向上、診断技術の高度化に取組中



＜超音波探触子によるき裂検出模式図＞＜超音波探触子＞

- ※浅いき裂の検出に適した屈折角が90度に近い探触子の超音波伝搬特性を活用した新たな感度補正法の開発
- ※超音波の反射波とき裂深さとの対応付けによるき裂の評価手法の開発

	従来技術(70度斜角探触子)	本技術
信頼性	・塗装の影響の補正が困難 ・技術者の技量差の影響あり	・塗装の影響の補正が可能 ・技量差によるき裂の誤検出を排除
精度	深さ 6mm 以上のき裂の有無を検出	深さ 3mm 以上のき裂の有無を検出
作業性	手動 探傷 (作業性・信頼性に課題あり)	自動 探傷 (探傷結果を位置情報とともに自動記録)



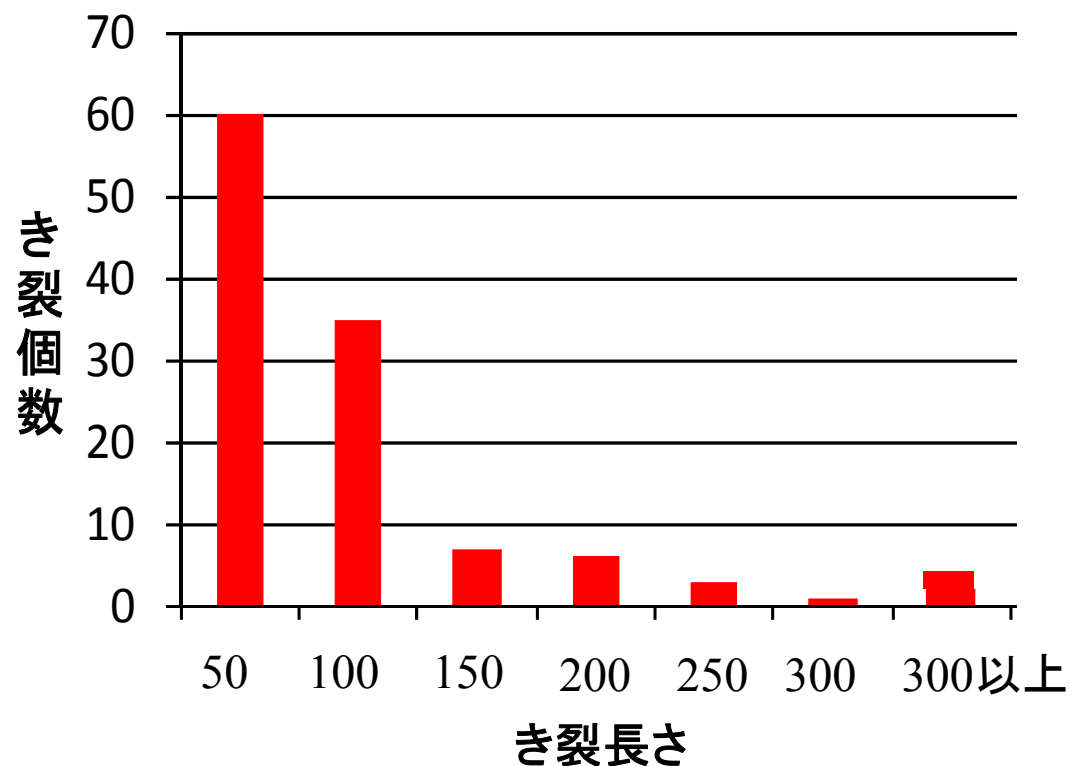
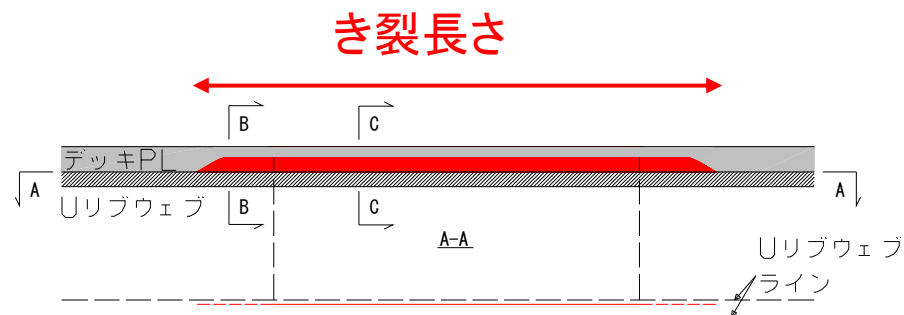
- (効果)
- ・点検の信頼性向上に貢献
 - ・合理的な対策の検討に活用
 - ・対策実施までの監視や対策効果の検証に活用

センサからき裂までの距離

実橋への適用事例

【調査事例】

- ・ 建設年度 1989年（供用）
- ・ 交通量 60,594台
（大型車混入率40%）
- ・ 調査長 259m
- ・ き裂数（自動探傷） 174個
- ・ 最大き裂長さ（自動探傷） 611mm

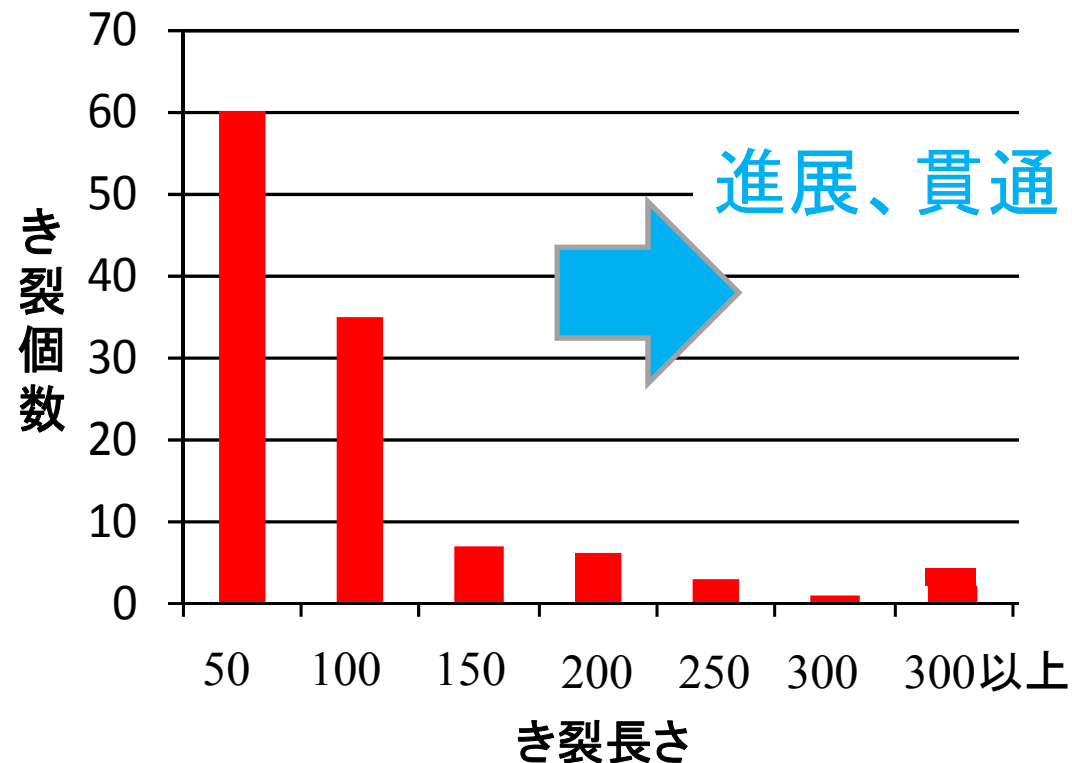


実橋への適用事例

【調査事例】

- ・ 建設年度 1989年（供用）
- ・ 交通量 60,594台
（大型車混入率40%）
- ・ 調査長 259m
- ・ き裂数（自動探傷） 174個
- ・ 最大き裂長さ（自動探傷） 611mm

○き裂の発生・進展性状の把握が必要
⇒調査結果に基づく診断手法へ



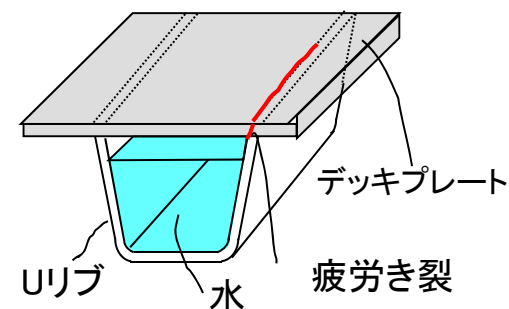
デッキ貫通き裂を見つけるための非破壊検査技術

ーUリブ内の滞水状況から間接的にき裂を検知する技術ー

- 既にき裂が発生している場合の対策実施までの状況把握(安全性確保)
- 信頼性、作業性の面で、他の汎用手法では課題あり
 - ・汎用型UTでは、塗膜の影響により誤検出の可能性
 - ・赤外線カメラでは、日照条件、測定時刻、水深により計測に制約や限界あり。



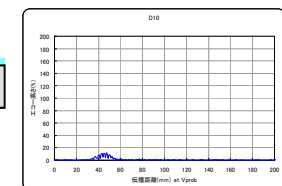
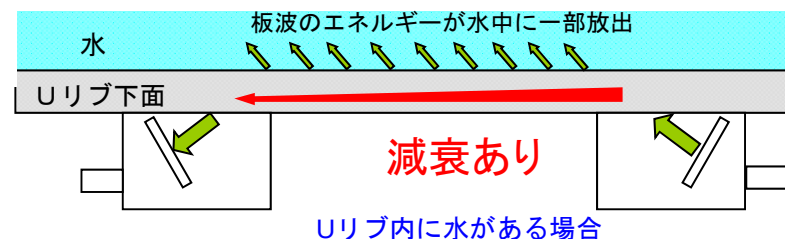
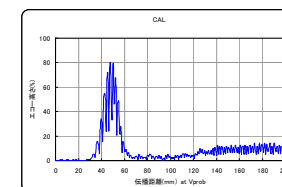
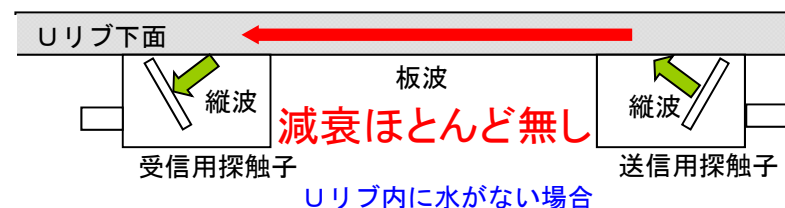
- Uリブ内の雨水の有無によりUリブを伝わる超音波が減衰することを利用した調査方法を提案
- 3m程度離れた距離から1箇所5秒程度で滞水の有無と深さ(数mm)の計測が可能



※現場架設のブロック毎に、ダイアフラム(仕切り板)が設置されており、その間に縦断勾配に応じて滞水

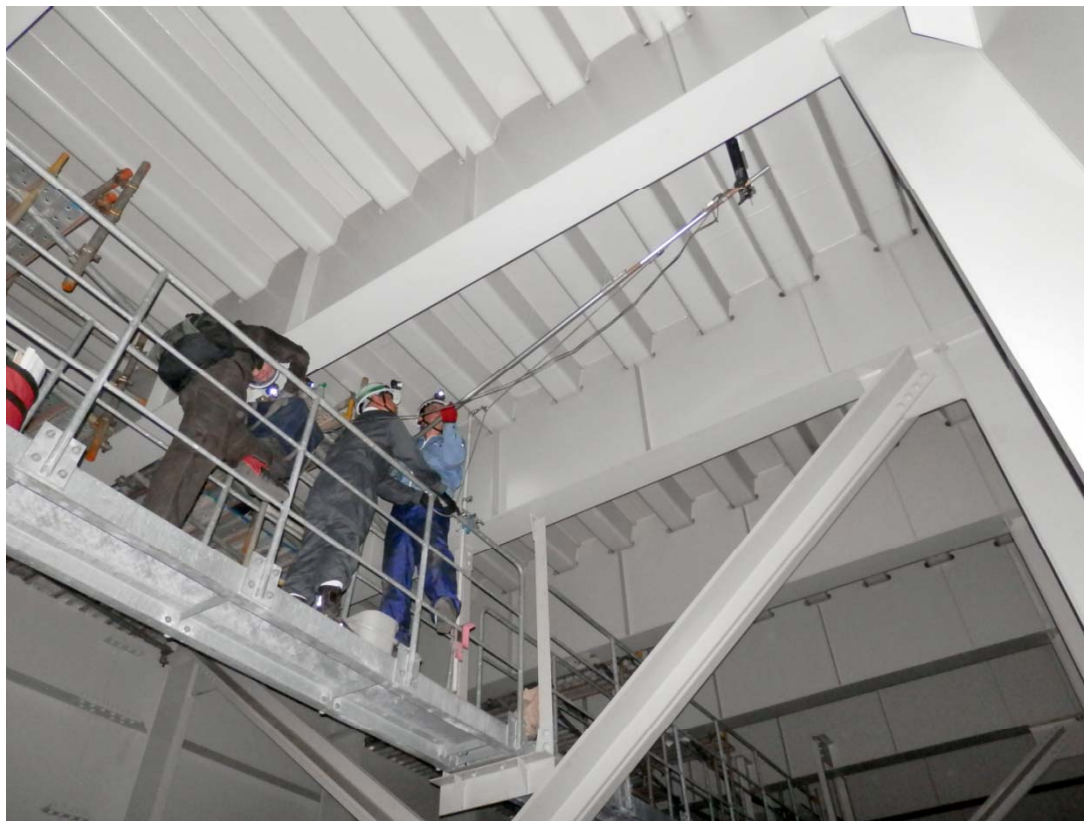


＜現場における適用事例＞



※Uリブ内に超音波(板波)を伝搬させ、振幅の大きさの変化により検知

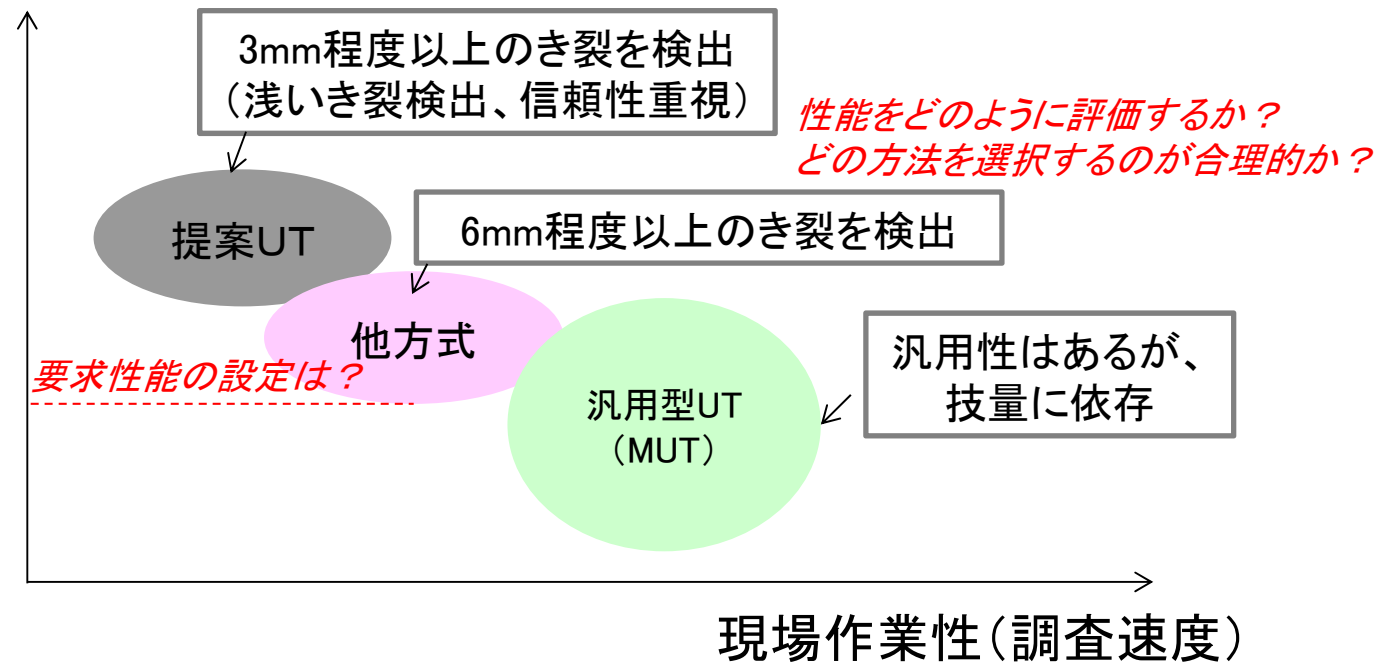
鋼床版Uリブ内の滞水検知の適用事例



技術開発に際しての課題

○技術の活用方法、要求性能の明確化と、性能評価方法の検討が必要

精度・信頼性

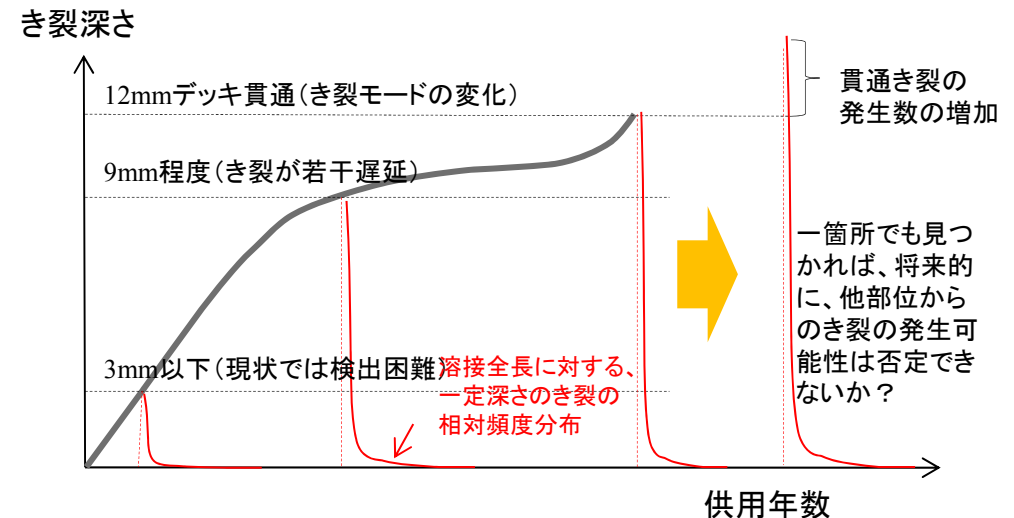


<技術の性能の関係イメージ>

非破壊検査技術の開発・評価に際しての課題

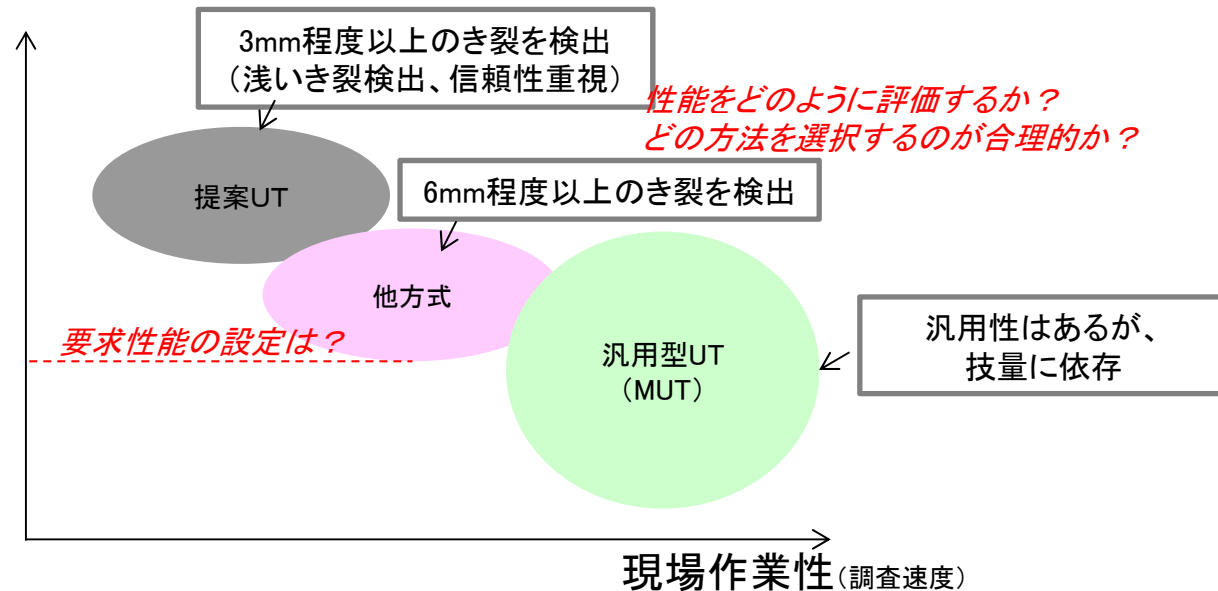
○非破壊調査事例は未だ少なく、き裂の発生・進展性状の全容の把握が必要
⇒調査結果の評価方法の提示へ

○技術の活用方法、要求性能の明確化と、性能評価方法の検討が必要



＜同一条件の溶接部からのき裂の発生傾向の想像図＞

精度・信頼性



＜技術の性能の関係イメージ＞

既設鋼床版の対策技術

- き裂が発見された場合、未だ発生していない箇所も含めて、鋼床版全体の応力軽減を図ることのできる対策が必要となる可能性大
 - ⇒効率的に補強可能な、鋼繊維補強コンクリート(SFRC)舗装について検証
- 研究成果等を踏まえ、適用の基本的な考え方、使用材料、構造細目、耐久性検証方法、施工方法等についてマニュアル作成

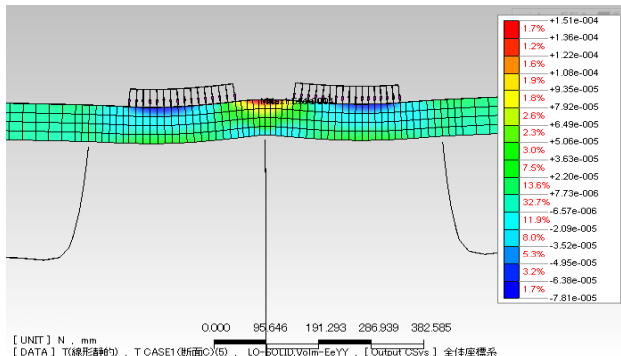
【補強工法に求められる性能】

- ・溶接部の局部応力軽減
- ・活荷重載荷等に対する疲労耐久性
- ・水の浸入や温度変化に対する耐久性

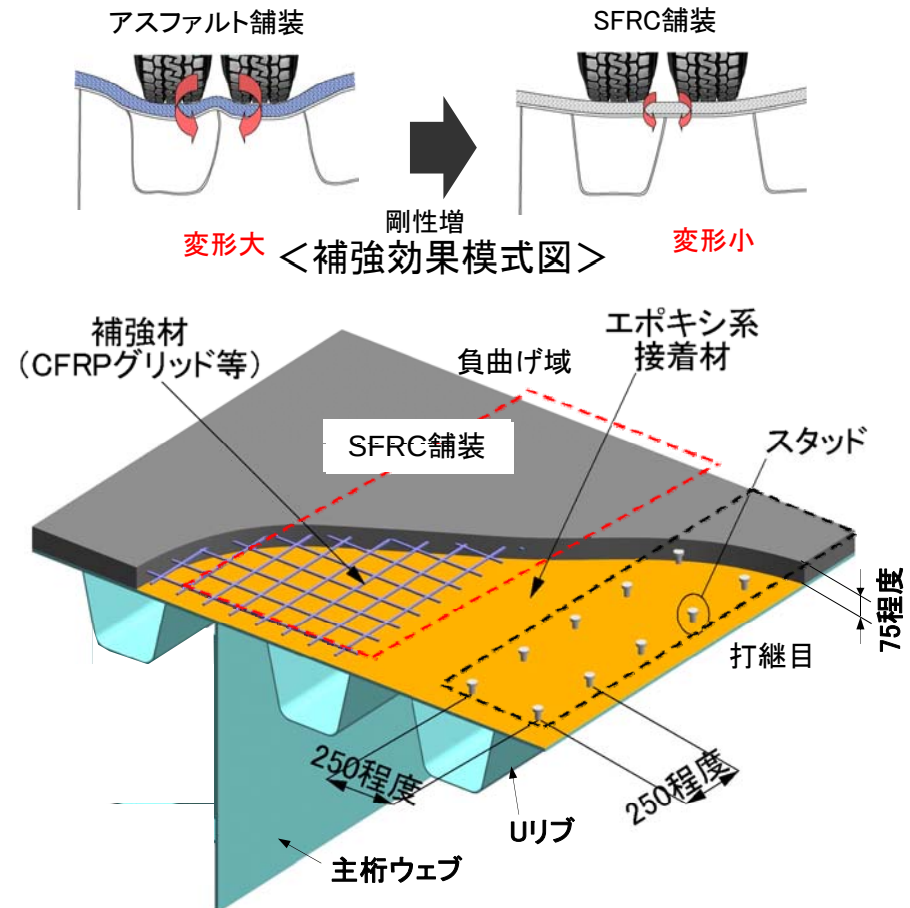
【検証の必要な内容】

ひび割れ発生は前提として、

- ・ひび割れ発生後の応力軽減効果の持続性
- ・水浸入の影響も含めたSFRC、接着材接合部の耐久性



＜主桁上の負曲げによる舗装ひずみ＞

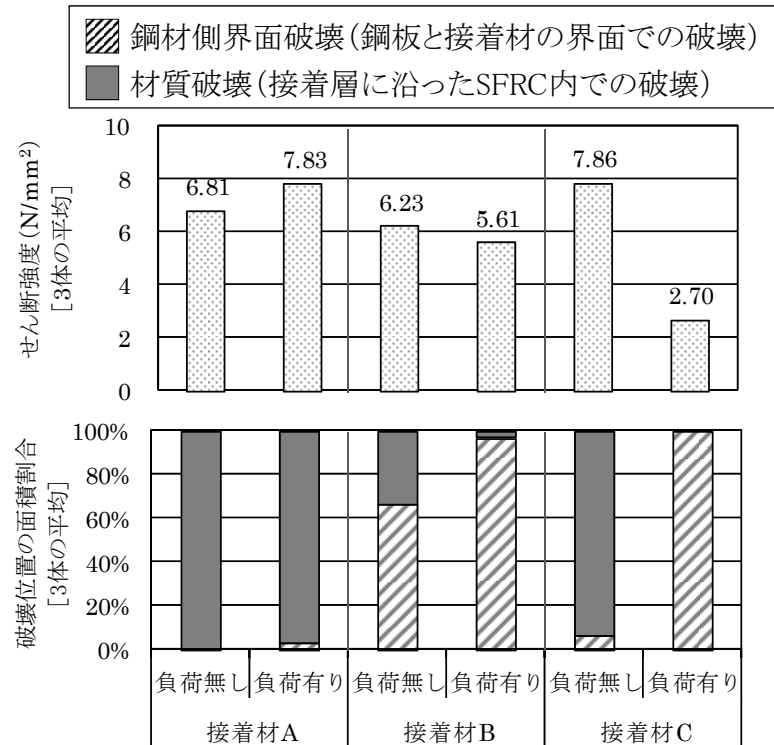


＜補強構造の概要＞

耐久性の評価

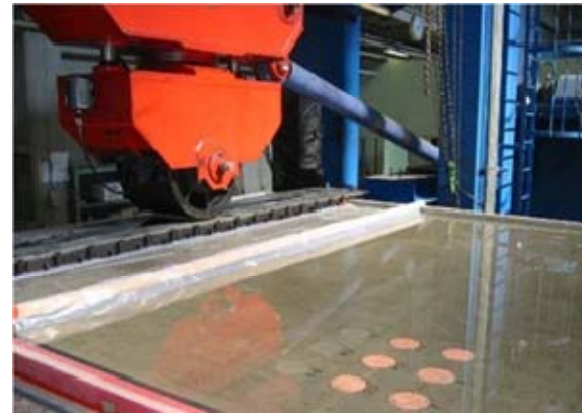
- 接合面及び舗装構造の耐久性を確保するための適切な接着材と舗装の選定が重要
- 特に大型車の繰返し走行, 温度変化及び水の影響に伴う経年的な劣化に対して耐久性を有することを、使用状況を模擬した試験により確認することが必要

＜せん断試験(温度と水による環境負荷の影響)＞



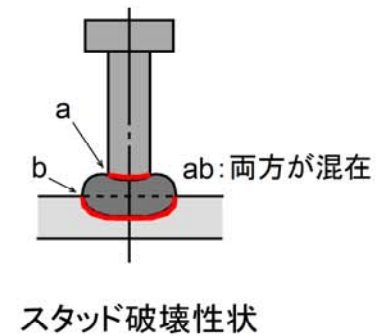
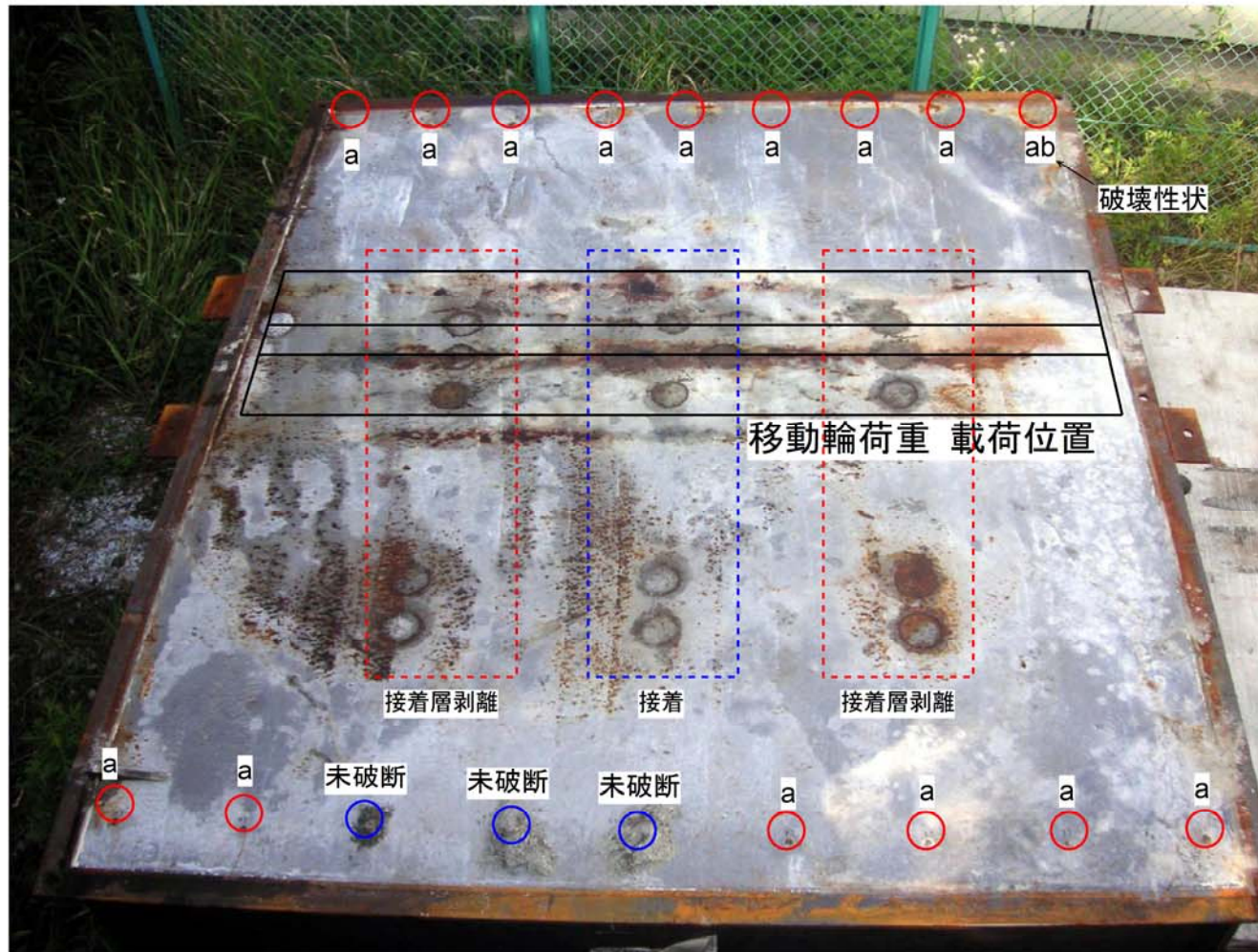
○接着材の性状及び硬化樹脂の物性だけでは、接合面としての性能が確保されとは限らず、**接着材接合面を模擬した試験**が必要

＜輪荷重走行試験＞



- 水張り状態で輪荷重150kNの200万回の負曲げ载荷に対して供用安全性に支障を来す**変状は発生せず**
 - ・主桁ウェブ上にひび割れがみられ、デッキ面までのひび割れの貫通を確認
 - ・ひび割れの顕著な進行、鋼床版のひずみの大幅な変化、接着強度の低下は見られず。
- 接着材の施工不良を想定した場合、**界面剥離が発生**
 - ・剥離の進行とともに、スタッドの疲労破壊へ
 - ・舗装に外観上の損傷はなし
 - ・鋼床版の応力低減効果も持続

舗装除去後の状態



- ◆ 中央部以外での接着層の剥離を確認。
- ◆ 端部スタッド18本中, 15本が破断。
- ◆ スタッドからデッキプレートに進展したき裂はなし。

設計・施工マニュアルの提案

- SFRCの基本物性(配合変動の影響)、乾燥収縮の影響、ひび割れ抵抗性等の試験を行い、材料の配合条件に反映
- 他の工法の適用も視野に、性能評価のための試験項目を整理
⇒接合部の環境負荷による強度、舗装構造の耐久性

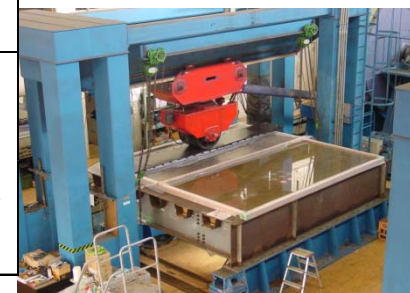
項 目		試験概要		
		材料の選定及び施工条件	環境負荷条件	試験方法、結果の評価
強度特性	接合面の強度	材料の組合せを考慮して確認 ・接着材 ・SFRCの配合	【養生】 28日間 【試験温度】 -10℃, 20℃, 50℃	a)せん試験 SFRCでの破壊の面積割合が90%以上
		工事毎に以下の施工条件を考慮 ・デッキプレートの温度 ・SFRC打設までの時間間隔 ・SFRCの配合	【養生】 28日間 【試験温度】 20℃	b)引張試験 SFRCでの破壊の面積割合が90%以上
耐久性	接合面の温度変化と水に対する耐久性	材料の組合せを考慮 ・接着材 ・SFRCの配合	【養生】 28日間 【環境負荷】 50℃の水中に28日間浸漬 【試験温度】 20℃	a)せん試験 SFRCでの破壊の面積割合が90%以上
	接合面及びSFRC舗装の疲労耐久性	以下の材料の組合せを考慮 ・接着材 ・SFRCの配合	【養生】 28日間 【試験温度】 20℃	c)輪荷重走行試験 供用性, 安全性に支障を来すおそれのある損傷が生じないこと



環境負荷下でのせん断試験



現場個別条件下での引張試験

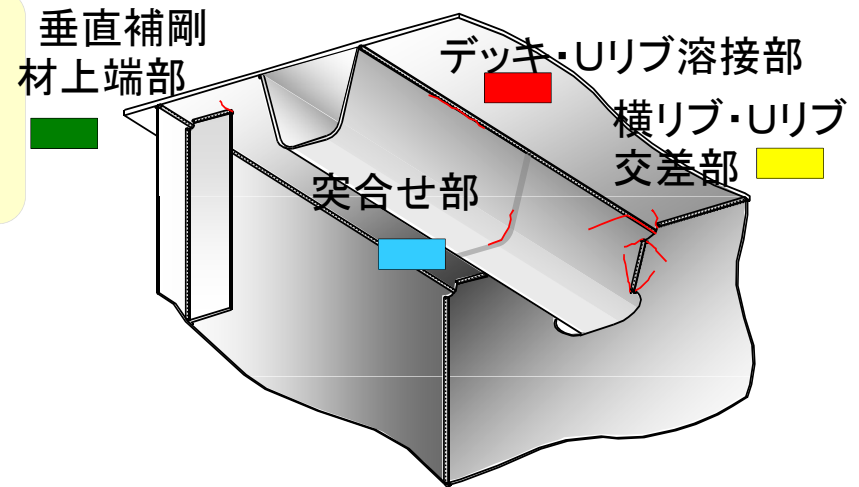


輪荷重走行試験

き裂の発生部位の傾向の調査事例

- 種類は、“その他”を除き類似
- 橋梁毎に発生傾向は異なる。
- ⇒今後のデータ蓄積と分析が必要

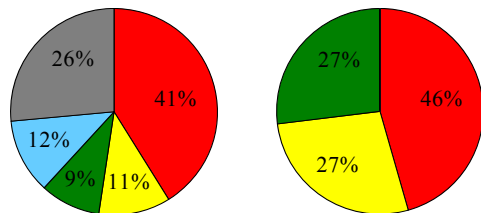
- デッキプレートとUリブの溶接部
- 横リブとUリブ交差部
- 垂直補剛材上端部
- Uリブ突き合わせ部
- その他



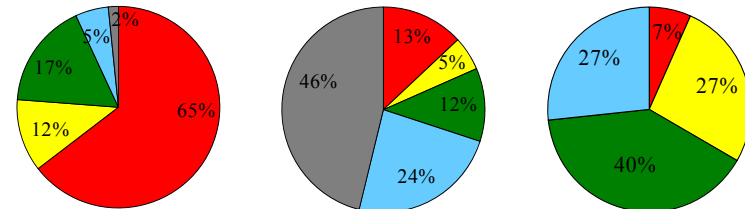
疲労き裂の種類

《路線・橋梁毎の損傷種別》

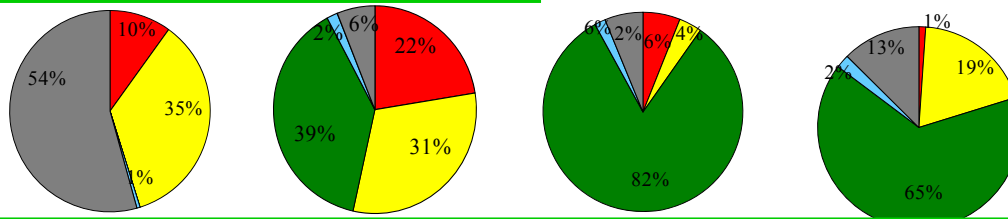
路線1, 2 (2~4千万台程度)



路線3 (1億台程度)



路線4 (5~8千万台程度)



※数字は、
累積大型車交通量

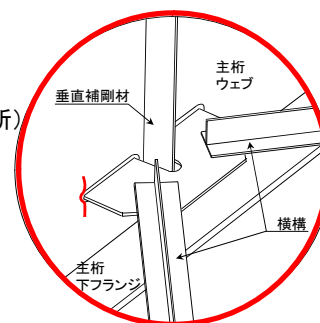
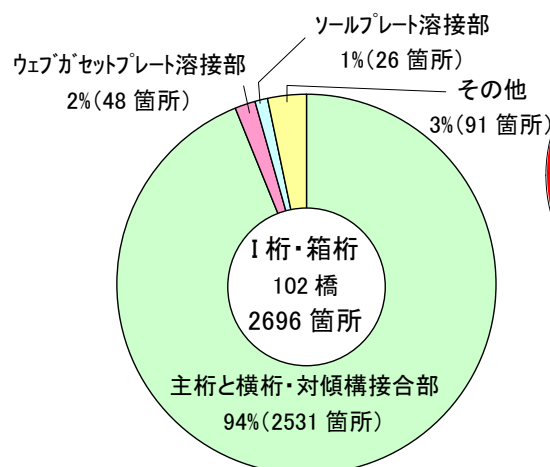
鋼 I 桁橋の疲労への対応

鋼 I 桁橋の疲労損傷部位

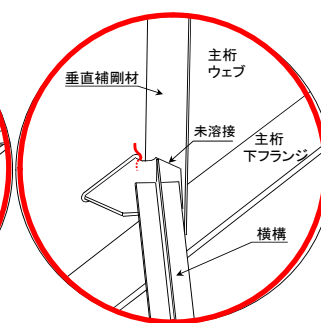
○定期点検結果を基に、損傷発生部位を整理

- ・主桁と横桁・対傾構接合部のき裂が大半を占める。
- ・主桁の致命的損傷につながるおそれのあるき裂の報告事例あり。

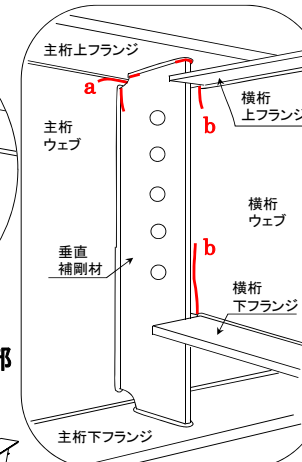
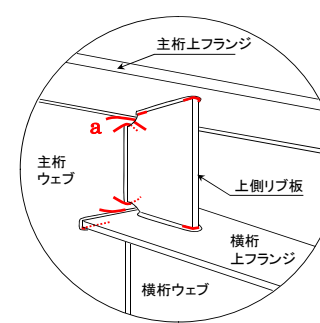
鋼I桁橋における主な損傷発生箇所(点検時に留意すべき部位)



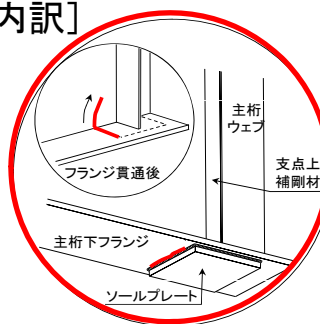
G2. 主桁ウェブガセットプレート溶接部



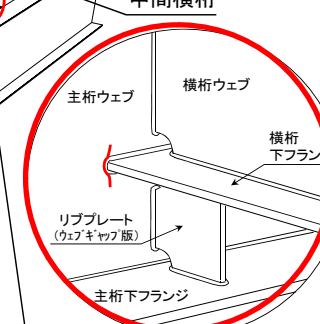
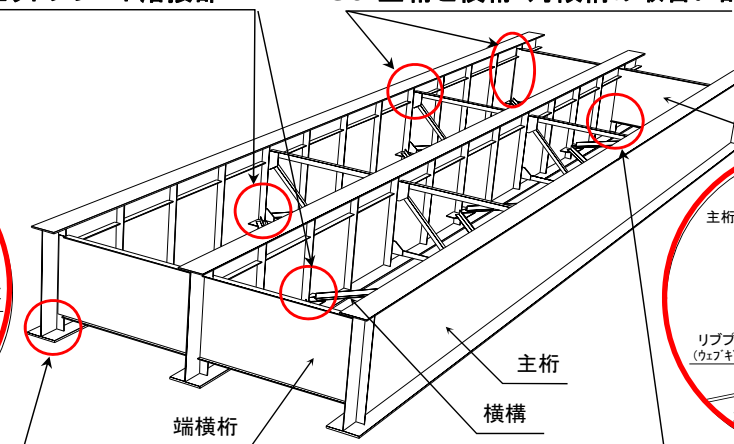
G6. 主桁と横桁・対傾構の取合い部



[桁橋における損傷発生部位の内訳]



G1. ソールプレート溶接部



G3. 主桁ウェブの横桁下フランジ溶接部

○ 致命的損傷につながるおそれのあるき裂

鋼 I 桁橋の疲労への取組み

○疲労による主桁の部分破断事例の発生

- ・疲労指針では適用すべきでない継手に区分
- ・疲労設計の対象主部材の溶接継手からのき裂

○き裂の発生の可能性や時期の予測は困難

- ・各種要因が影響、点検時にき裂を確実に発見し、適切な対処が重要

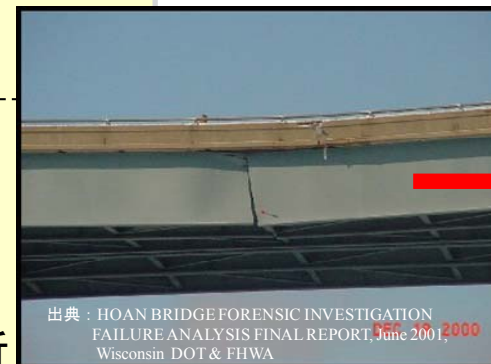
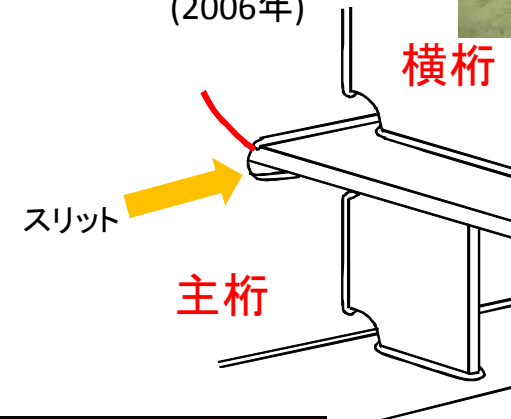
○管理の信頼性向上の観点から、主桁継手の疲労耐久性を調査

- ・き裂の発生可能性
 - ・き裂発生後の脆性破壊への移行危険性
⇒点検頻度、部位、優先度等の検討
-
- ・古い年代の鋼部材の材料・強度特性の分析
⇒脆性破壊移行のき裂長の評価
 - ・実橋計測(供用下応力頻度計測)データの分析
 - ・再現設計による損傷度と構造条件の関係の分析
⇒き裂の発生し易さを相対評価する手法の検討



主桁ウェブ溶接部より、1mを超えるき裂が発生

鋼 I 桁橋の桁破断事例
(2006年)



海外の桁破断事例(米国、2000年)

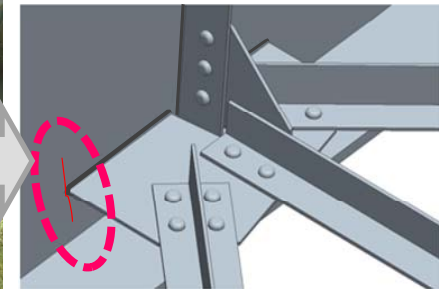
3主桁のうち2主桁のウェブ溶接部より脆性破壊、桁破断、架替え

古い年代の鋼部材の限界き裂長の検討

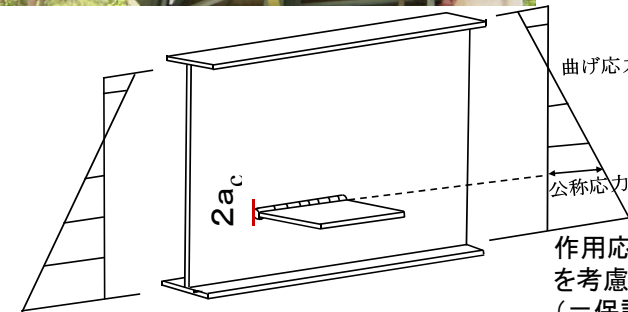
○CTOD試験の結果と、シャルピー衝撃試験結果(既往のデータ含む)から推定した値を基に破壊靱性値(き裂に対する材料抵抗値の下限側の値を整理

○鋼 I 桁橋の面外ガセット継手を対象に、実橋 の交通条件や環境条件の中で、き裂が脆性破壊に移行する可能性のあるき裂長(限界き裂長)の下限側の値を試算

⇒き裂の早期発見・対処の重要性



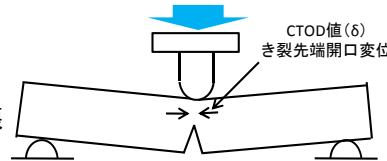
＜面外ガセット継手＞



作用応力は、面外ガセット溶接継手位置を考慮して下フランジ位置の許容応力度(=保証降伏点/約1.7)の90%と仮定

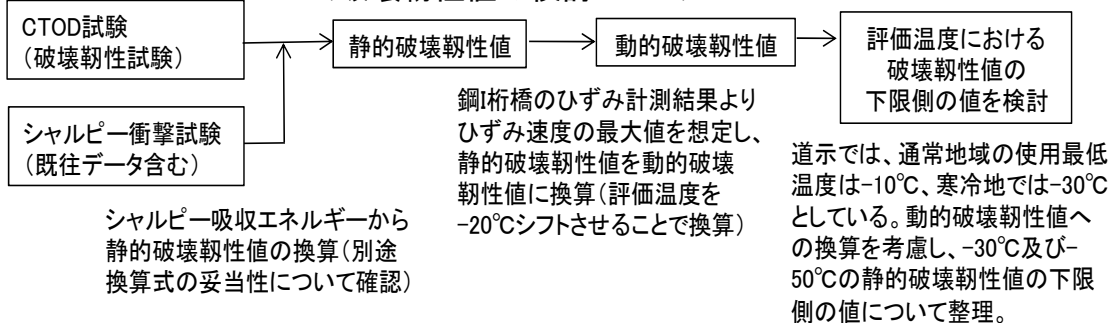
CTOD試験の概要

初期き裂(疲労き裂)を導入した試験片に対して3点曲げ試験を行い、脆性破壊した際のき裂開口変位量(限界CTOD値)を計測

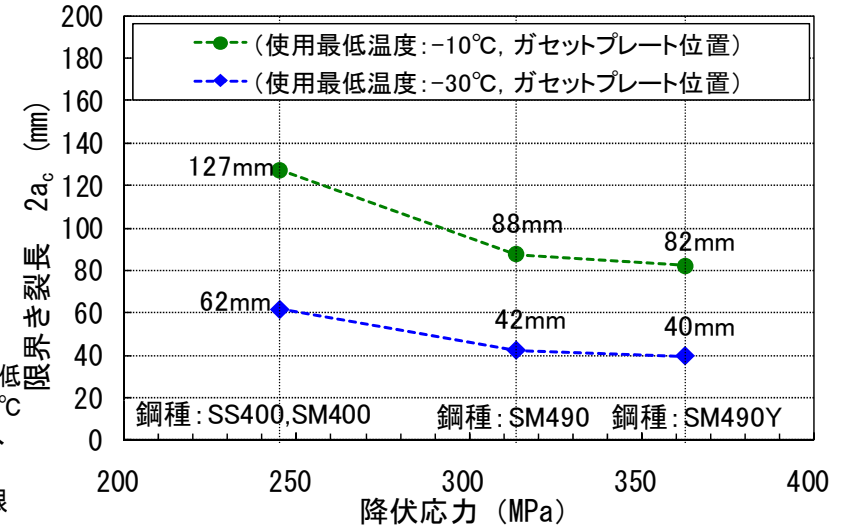


CTOD試験の概要

＜破壊靱性値の検討フロー＞



＜対象溶接継手とき裂＞



＜限界き裂長の試算結果＞

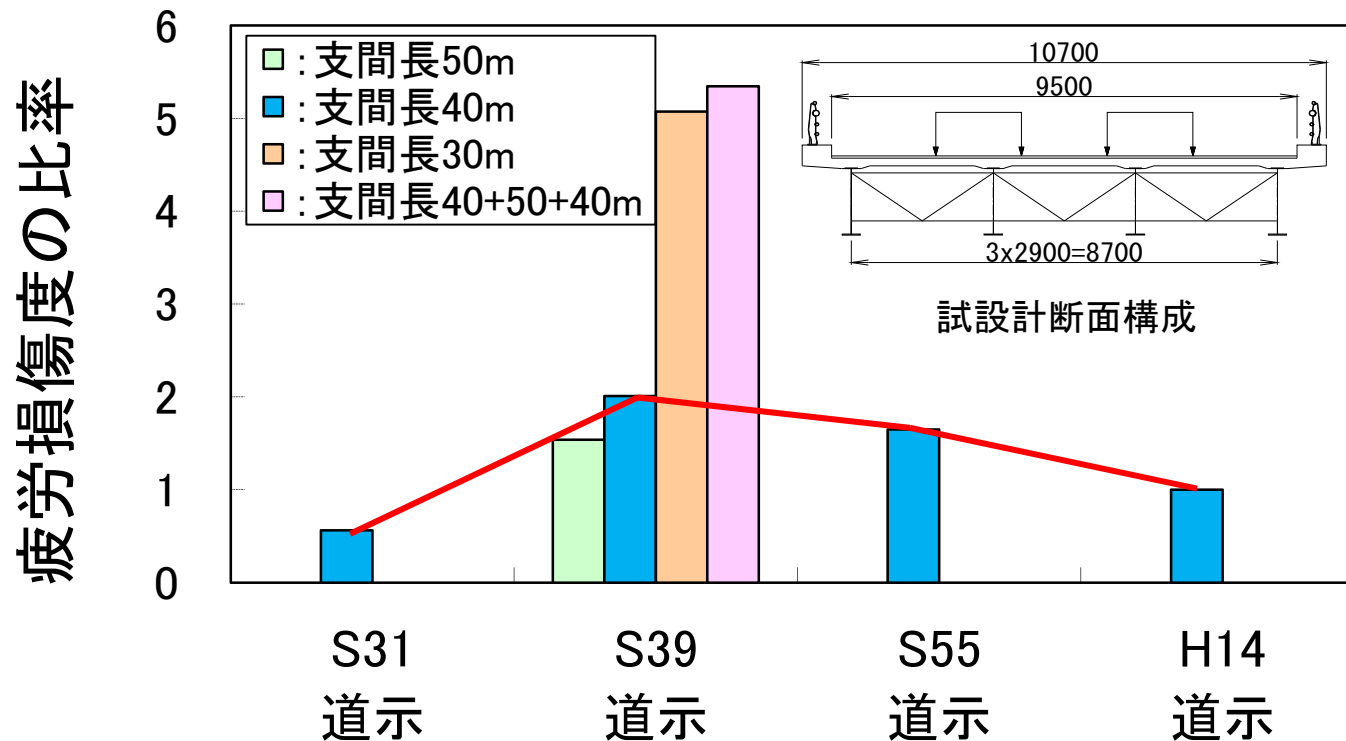
年代別の鋼 I 桁橋の疲労の発生しやすいさ

○既設橋の再現設計を行い、適用基準、構造条件と損傷度の関係进行分析

⇒S39道示が相対的に厳しい傾向

- ・使用鋼材の許容応力度の変化の影響
- ・設計活荷重応力度の変化(TL-20→B活荷重)
- ・床版等の基準変遷に伴う、死活荷重応力度の増加

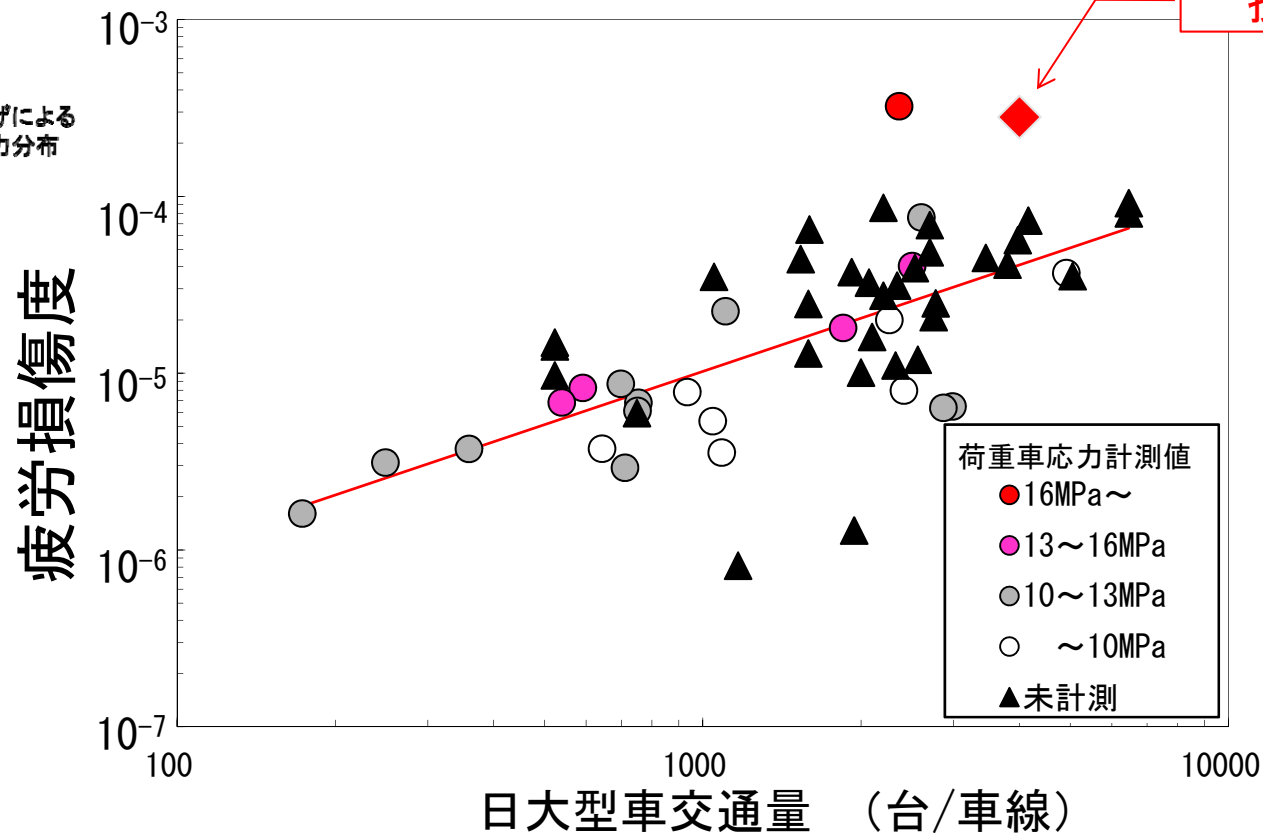
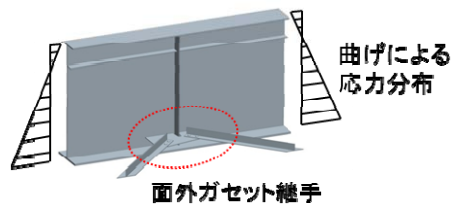
⇒T荷重振幅の大きい構造では厳しい傾向(短支間、連続桁、幅員小)



支間中央位置における疲労損傷度の比率
(H14道示の支間長40mの場合を1とする)

既設橋の応力実態と疲労設計との関係

- 鋼桁橋の応力頻度計測結果と既往データによる損傷度を分析
- 損傷度の相対的に高い橋では疲労の影響も厳しい。
⇒日大型車交通量が多く、構造上、活荷重載荷時の応力が大きい橋ほど、疲労損傷度は相対的に大きくなる傾向

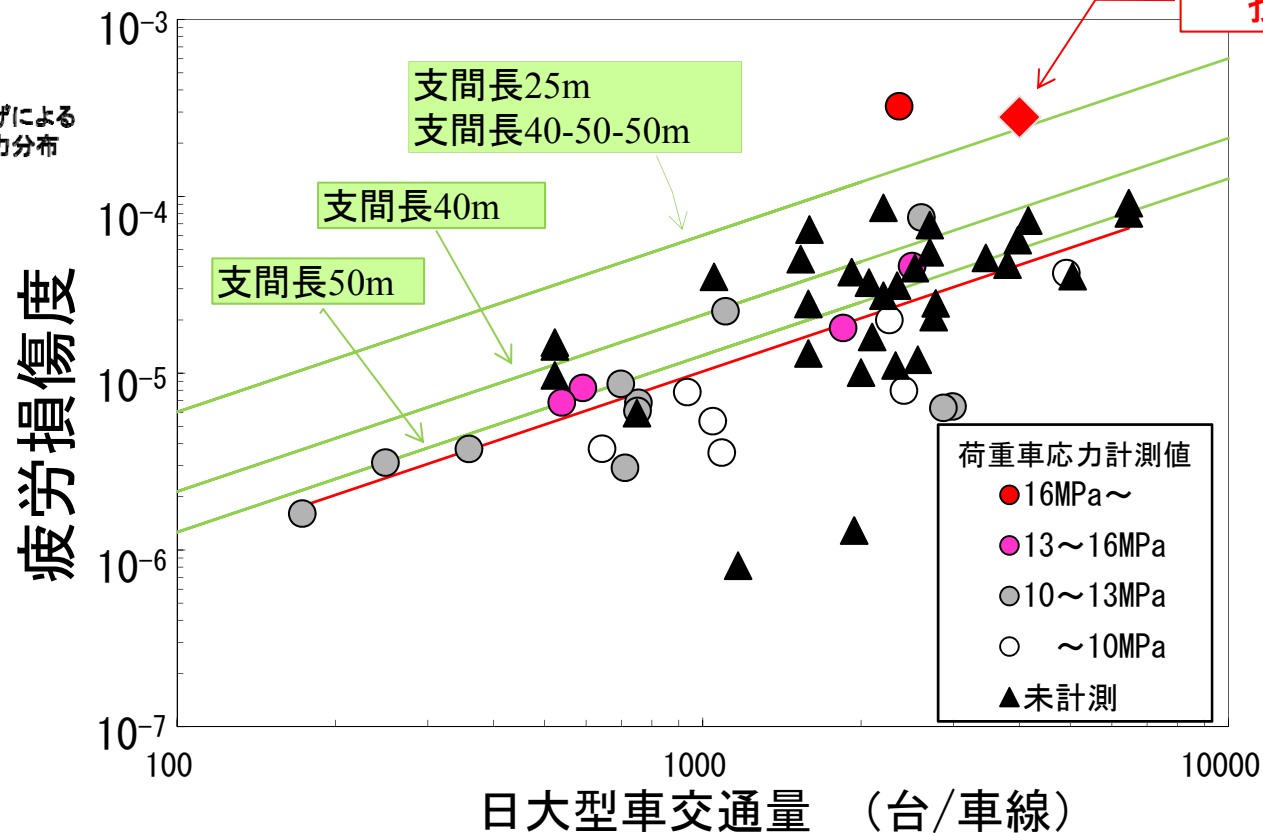
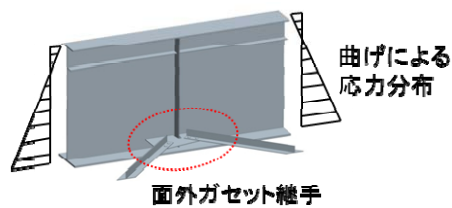


既設橋計測データに基づく疲労損傷度と日大型交通量の関係

※損傷度は、各橋梁の最大応力が発生した主桁の24時間応力頻度計測データ
(計測箇所: 支間中央下フランジ)を用いて、累積損傷被害則より算出

既設橋の応力実態と疲労設計との関係

- 鋼桁橋の応力頻度計測結果と既往データによる損傷度を分析
- 損傷度の相対的に高い橋では疲労の影響も厳しい。
⇒日大型車交通量が多く、構造上、活荷重載荷時の応力が大きい橋ほど、疲労損傷度は相対的に大きくなる傾向

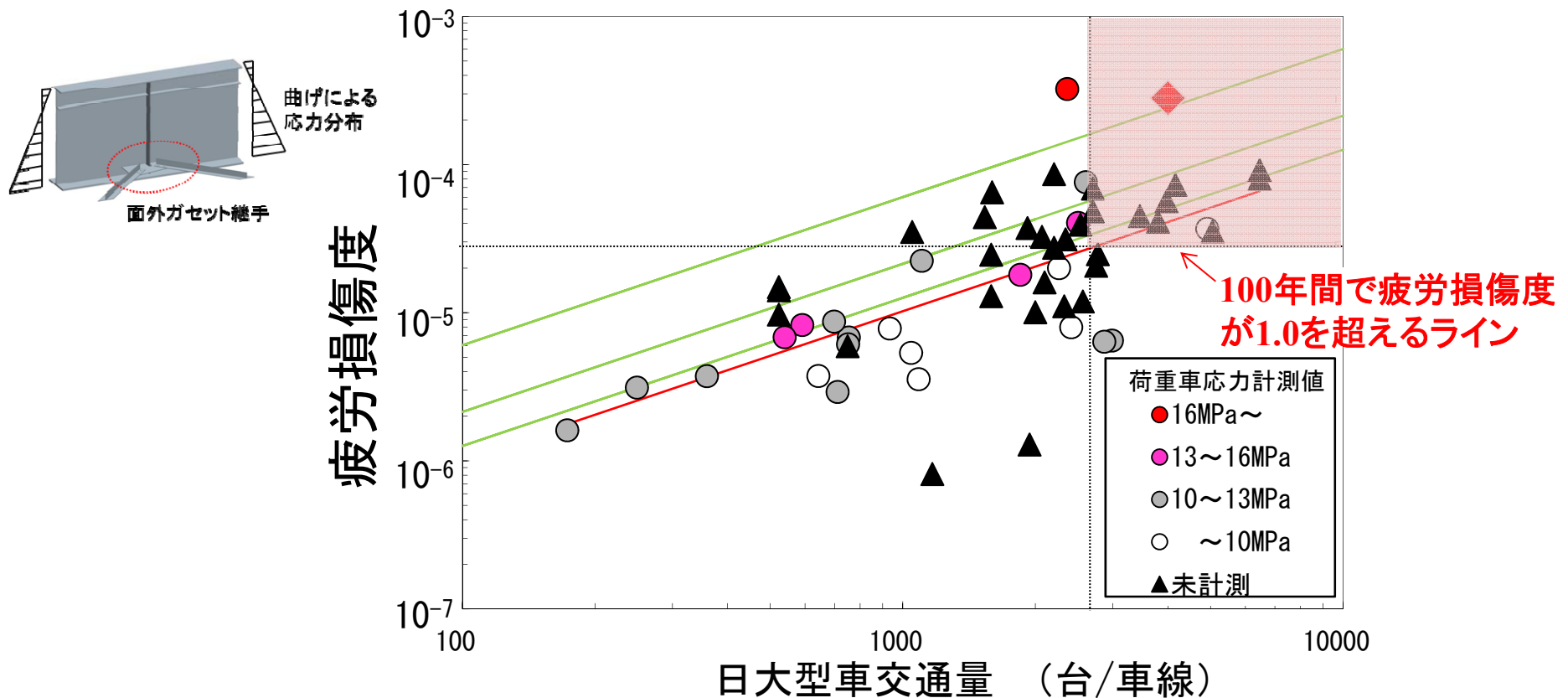


既設橋計測データに基づく疲労損傷度と日大型交通量の関係

※損傷度は、各橋梁の最大応力が発生した主桁の24時間応力頻度計測データ
(計測箇所: 支間中央下フランジ)を用いて、累積損傷被害則より算出

既設橋の応力実態と疲労設計との関係

- 鋼桁橋の応力頻度計測結果と既往データによる損傷度を分析
- 損傷度の相対的に高い橋では疲労の影響も厳しい。
⇒日大型車交通量が多く、構造上、活荷重載荷時の応力が大きい橋ほど、疲労損傷度は相対的に大きくなる傾向



既設橋計測データに基づく疲労損傷度と日大型交通量の関係

※損傷度は、各橋梁の最大応力が発生した主桁の24時間応力頻度計測データ
(計測箇所: 支間中央下フランジ)を用いて、累積損傷被害則より算出

トラス橋の主構部材の 腐食への対応

※詳細については、臨床研究パンフレット中の参考文献を参照

損傷事例と研究の背景

○トラス橋において、橋全体の安全性に直結する、主部材の損傷や不具合事例が相次いで発生

致命的損傷を防ぐための調査・診断方法

- ・損傷しやすい部位は？
- ・腐食による耐荷力の低下はどの程度か？
(どの程度の交通供用に耐えられるか？)
- ・どのように耐荷力の評価を行うのが良いか？



安全性(耐荷性能)の評価手法



(出典:NTSB Highway Accident Report,
Collapse of I-35W Highway Bridge)

3径間連続上路トラス
(供用40年)



米国I-35W橋の崩落事故(2007年8月)



12連単純トラス(供用44年)

トラス橋の斜材の腐食・破断(2007年6月)



3径間連続トラス(供用41年)

トラス橋の斜材の腐食・破断(2007年8月)

(出典:国土交通省資料)

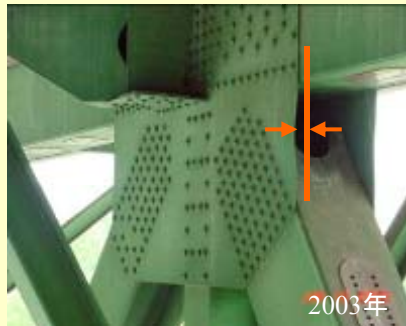
ミネアポリス I-35W橋の崩落事故 NTSB報告

-鋼トラス橋におけるガセットプレートの維持管理の重要性-

《格点部の維持管理に係わる指摘事項》

これまで認識されてこなかった格点部の腐食欠損や変形等の損傷に対する点検・状態評価の重要性を指摘

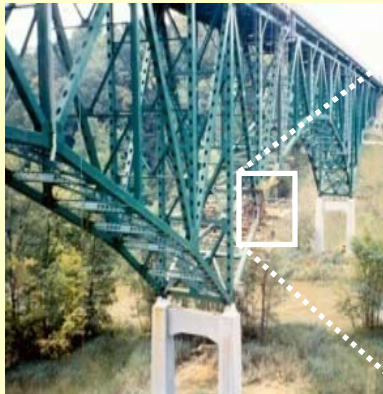
⇒点検研修、点検マニュアル等への反映を勧告



面外変形（崩壊の起点とされた板厚が不足していたガセット）



ガセットの局所腐食欠損の例



直上のジョイントからの漏水に伴う断面欠損による座屈

出典：NTSB Highway Accident Report Collapse of I-35W Highway Bridge

《格点部の維持管理の現状》



ガセット部の滞水、土砂堆積、腐食の事例

残存耐荷性能評価への取り組み

部材レベルのアプローチ

1. 腐食部材の残存耐荷性能評価手法の開発

⇒ 腐食状況の調査、載荷試験、構造解析

- ・腐食状況と部材耐力の関連付け
- ・腐食状況に応じた残存耐荷性能の評価
- ・錆層上からの非破壊検査手法の適用性評価と実用的な調査手法の考案
- ・腐食状況の調査手法の提示

全体レベルのアプローチ

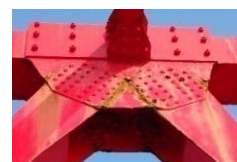
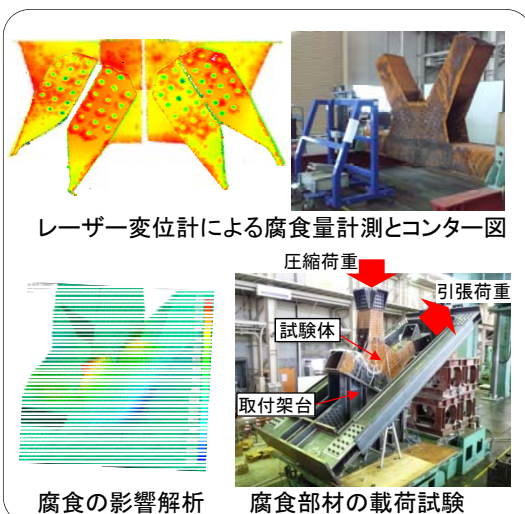
2. 橋全体系の耐荷性能評価のためのモデル化手法の開発

⇒ 実橋計測、全体構造解析

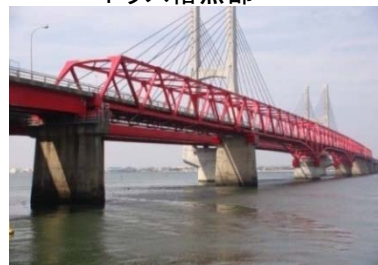
- ・全体挙動の把握
- ・実務レベルモデルの適用性評価
- ・部材耐力喪失前後の耐荷性能の評価

3. 維持管理実務への反映

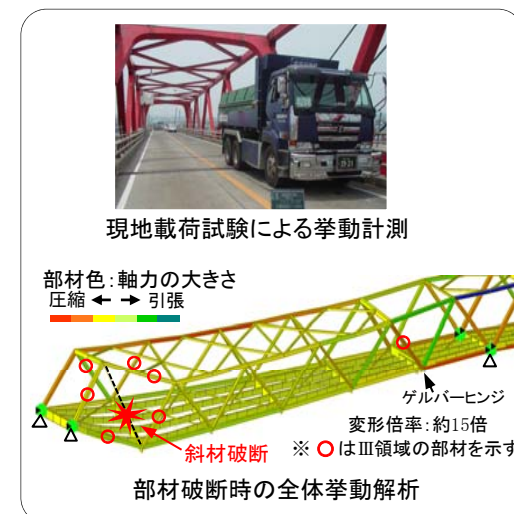
- ・維持管理上の留意点、耐荷力評価の考え方
- ⇒ 技術相談、研修等に活用、情報提供



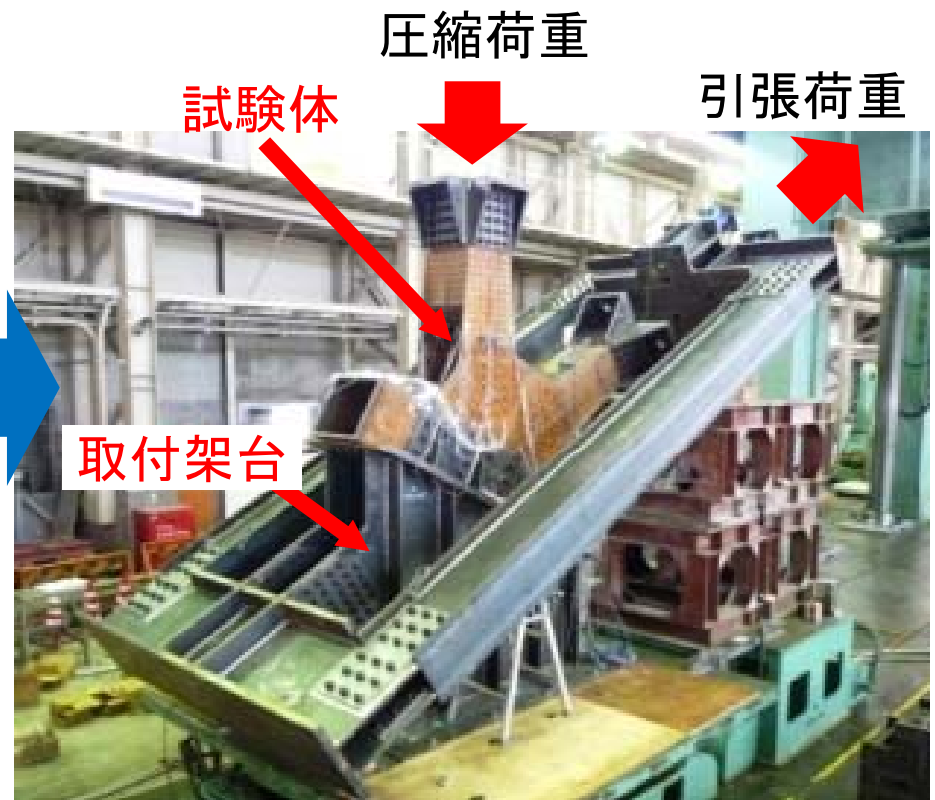
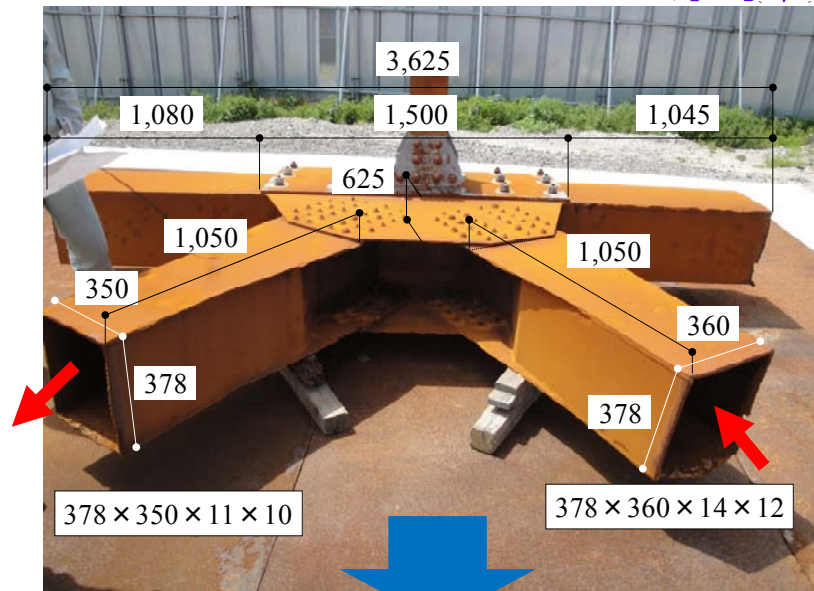
トラス格点部



臨床研究の対象とした鋼トラス橋



腐食試験体

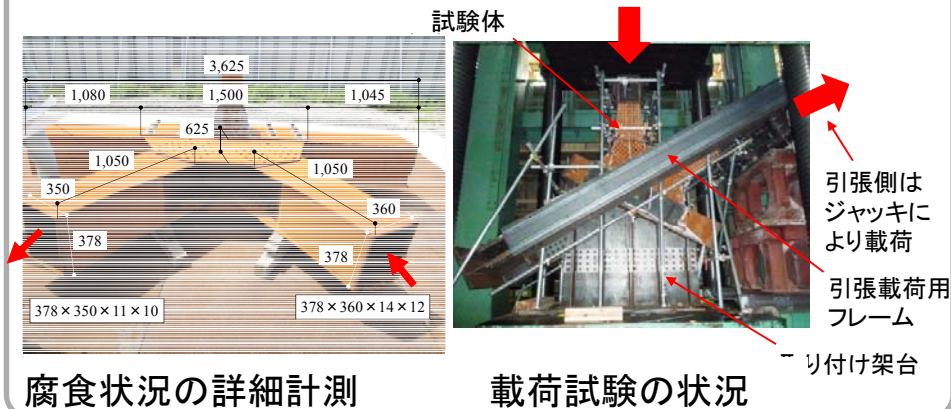


圧縮を受けるトラス格点部の残存耐荷力

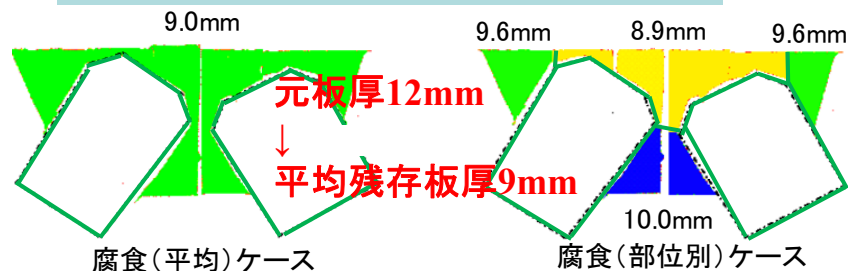
腐食量計測、載荷試験、腐食を考慮した 弾塑性FEM解析により腐食時の挙動を検討

- ・実際の腐食を想定した場合の破壊挙動、耐荷力の低下度合を把握
- ・平均残存板厚より、耐荷力を概略評価可能

腐食量計測と載荷試験状況



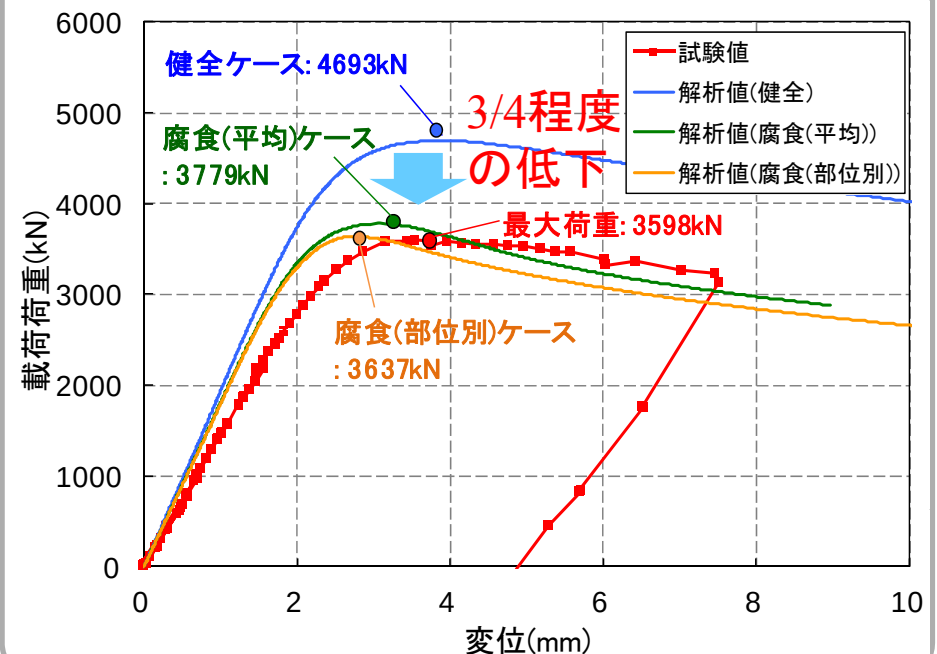
ガセットの減肉板厚のモデル化



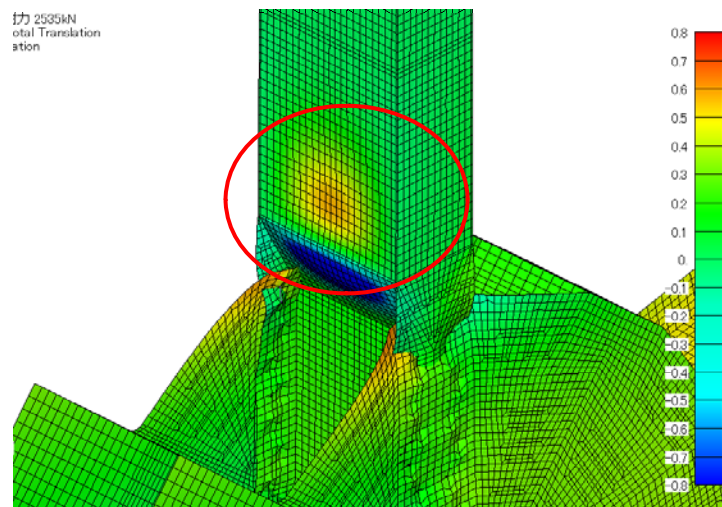
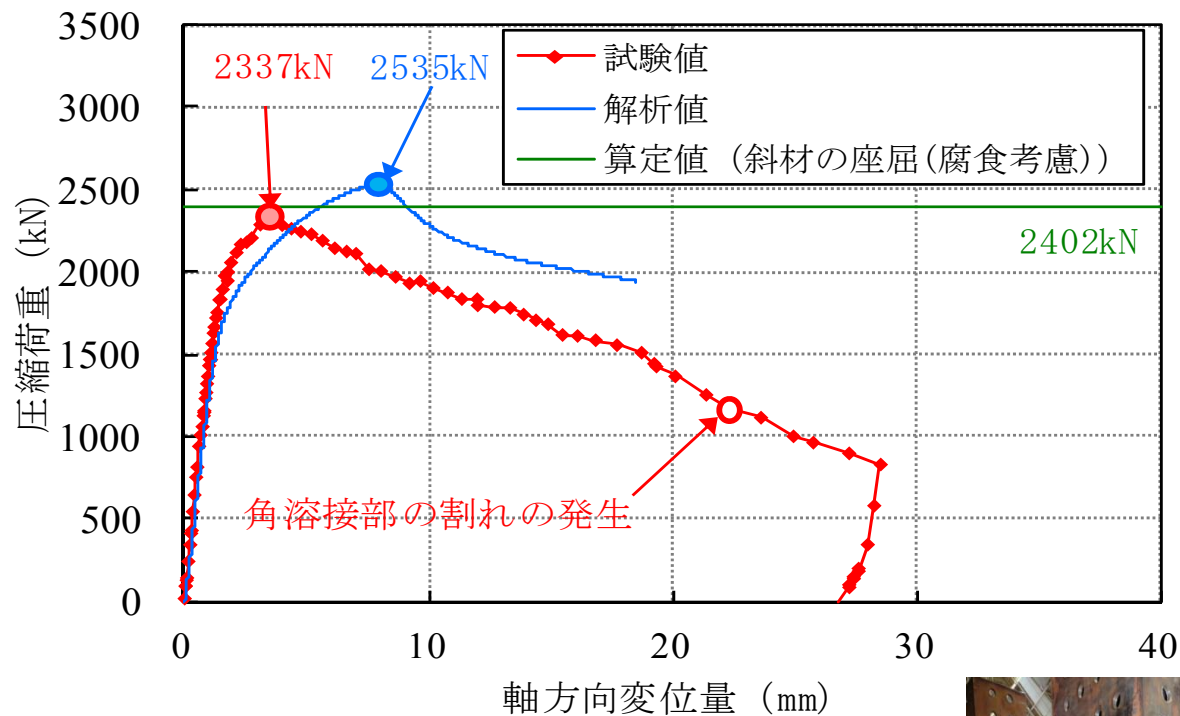
破壞性状



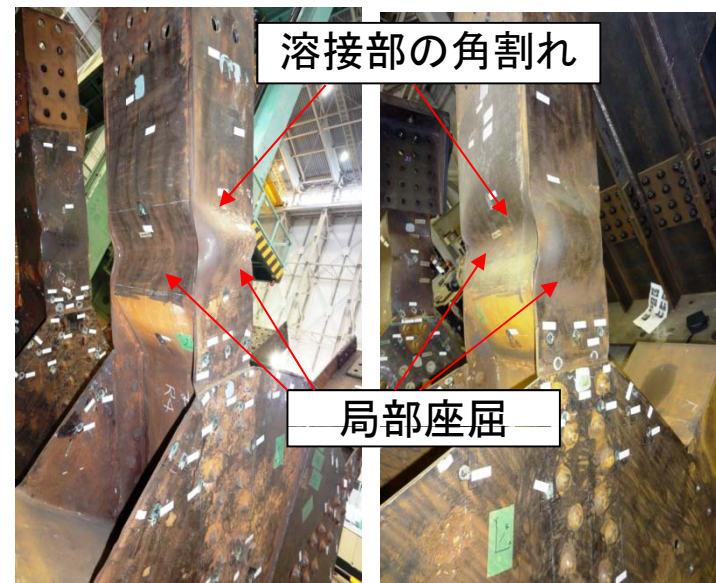
壓縮荷重－載荷點鉛直變位關係



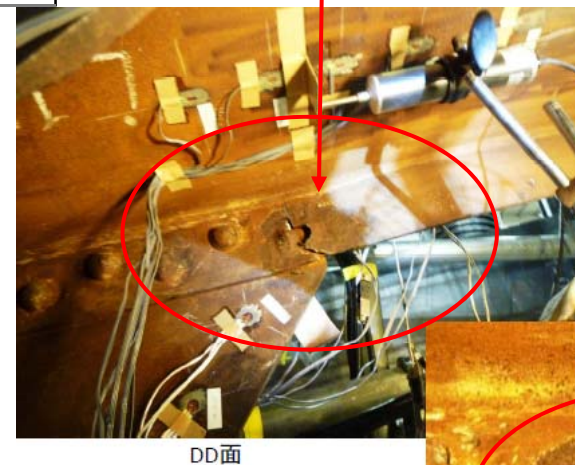
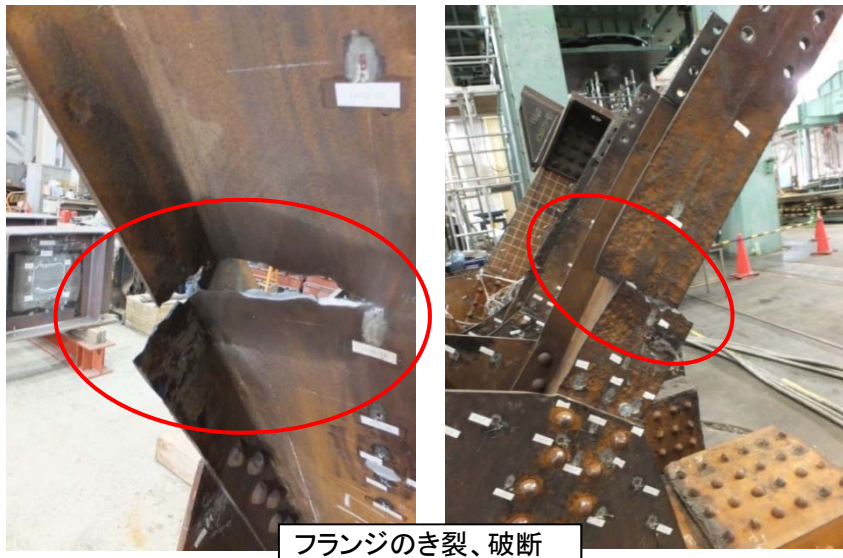
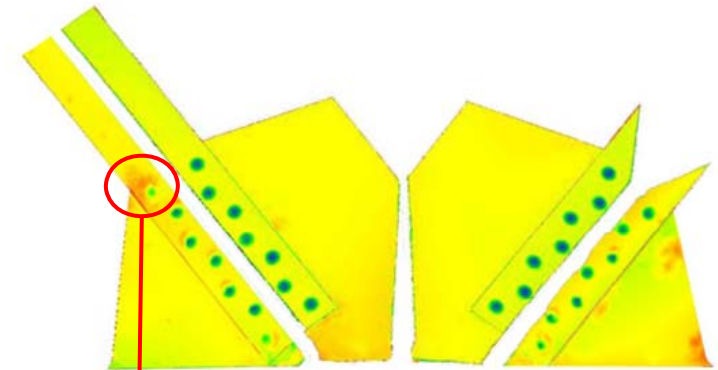
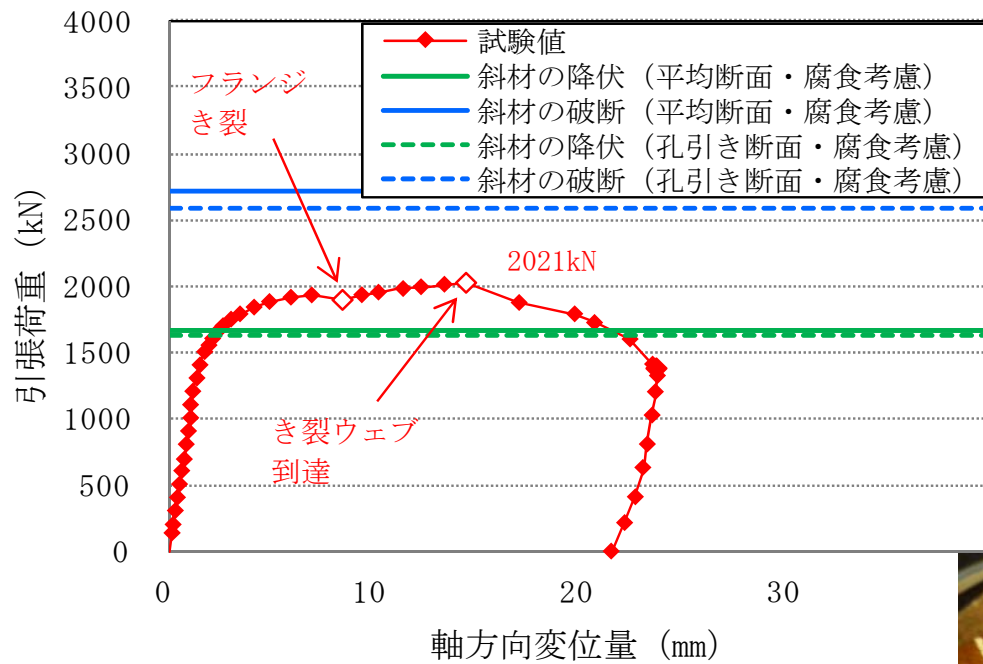
圧縮側の試験結果-斜材側が座屈



コンターは斜材ウェブに対する面外方向変位を表わす



引張側の試験結果-欠損部からのき裂発生



リベット周りの破壊

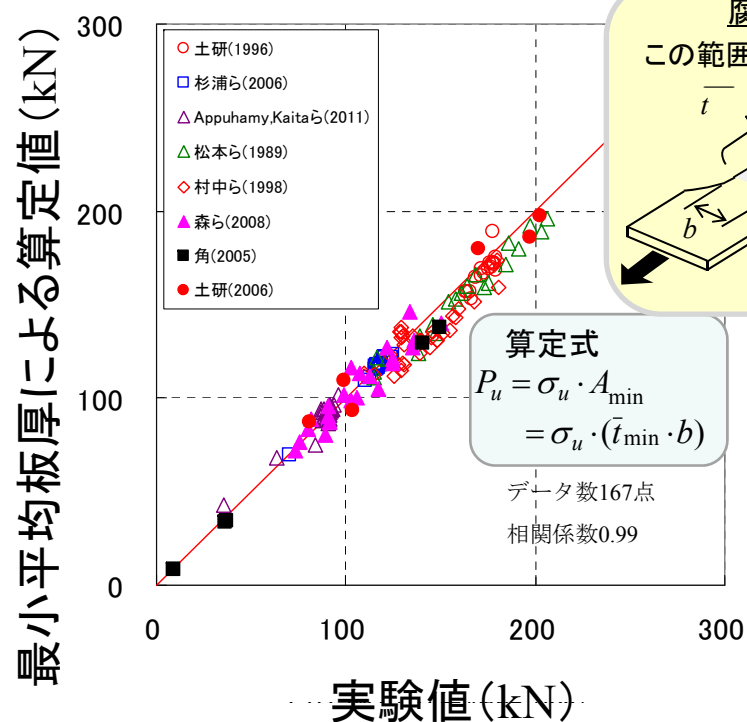


引張を受ける主構部材の残存耐荷力

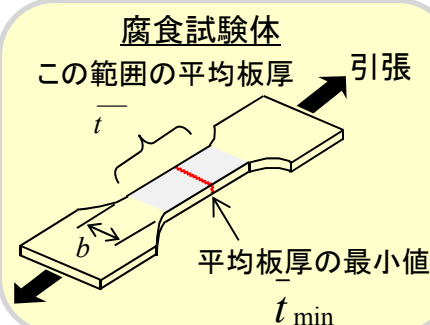
- ・腐食鋼板の引張試験、既存の試験結果の収集(167体)を行い、残存強度と減肉量との関係を分析。今回の試験体との比較

- ・作用力に対し、概ね、直角方向の最小断面で破壊。
- ・最小断面積(最小平均板厚)による耐荷力評価式の妥当性を検証

既存の耐荷力評価式とその検証



引張強度の実験値と算定値の関係

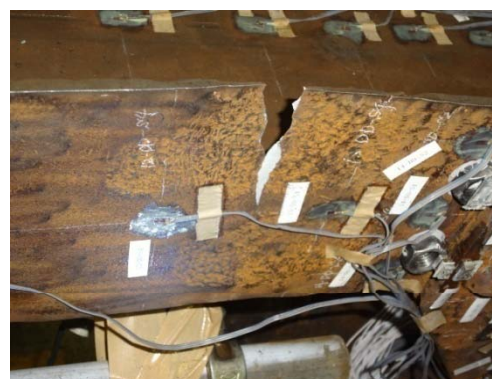


引張部材(H断面)の破壊性状

引張荷重の載荷過程において、腐食による応力集中部より、き裂が発生、進展



フランジ縁端の応力集中部からの複数き裂の発生



最小断面で破壊が進展

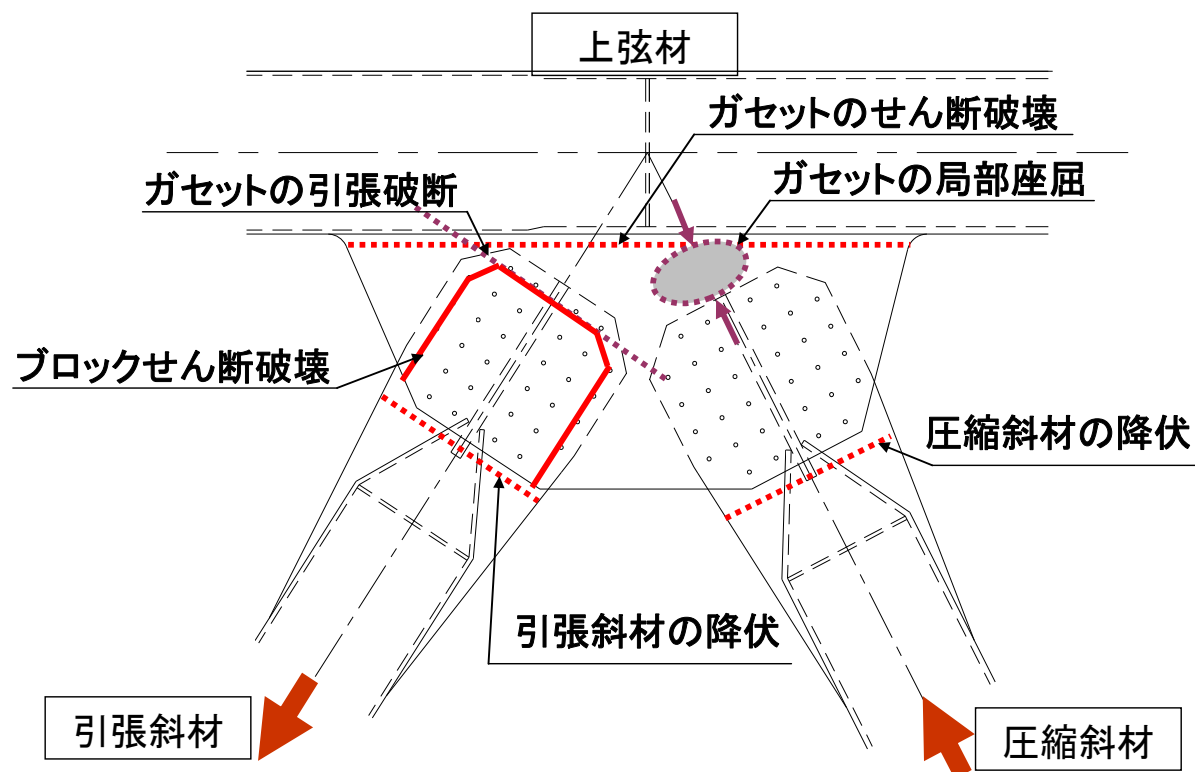


第一リベット孔引き部での部分破断

トラス格点部の耐荷力評価手法の検討

- ・腐食時に想定される破壊性状を整理。それぞれの耐荷力評価式を検討中
- ・腐食状況や格点部の構造諸元によっては、斜材接合部の引張降伏等がクリティカルとなる可能性

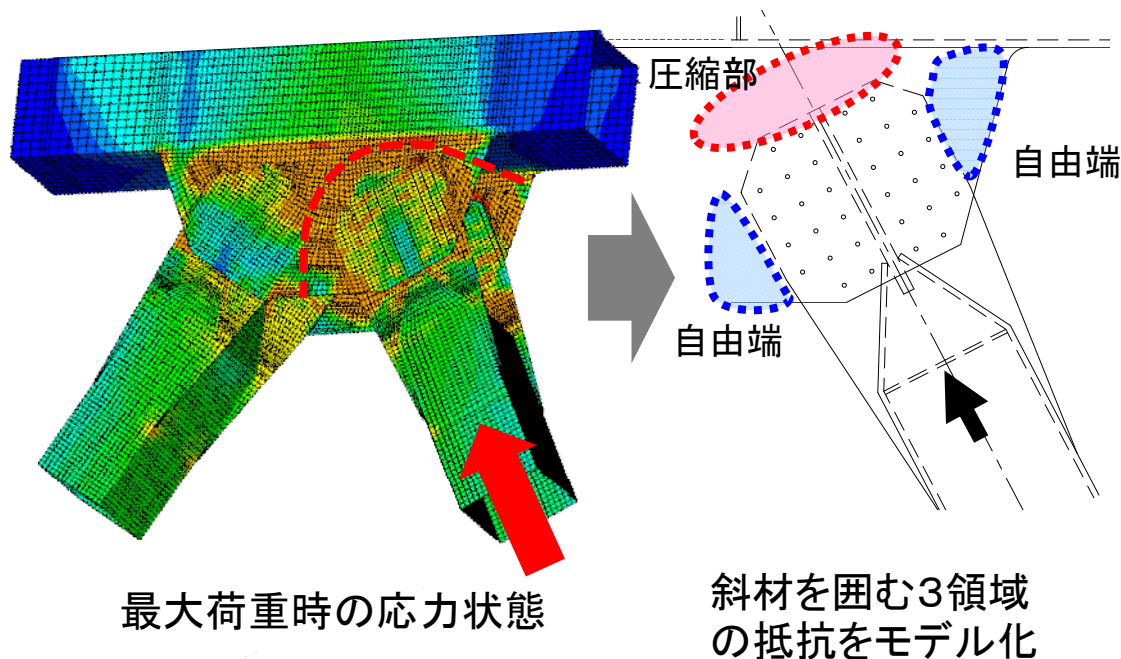
＜想定される破壊性状＞



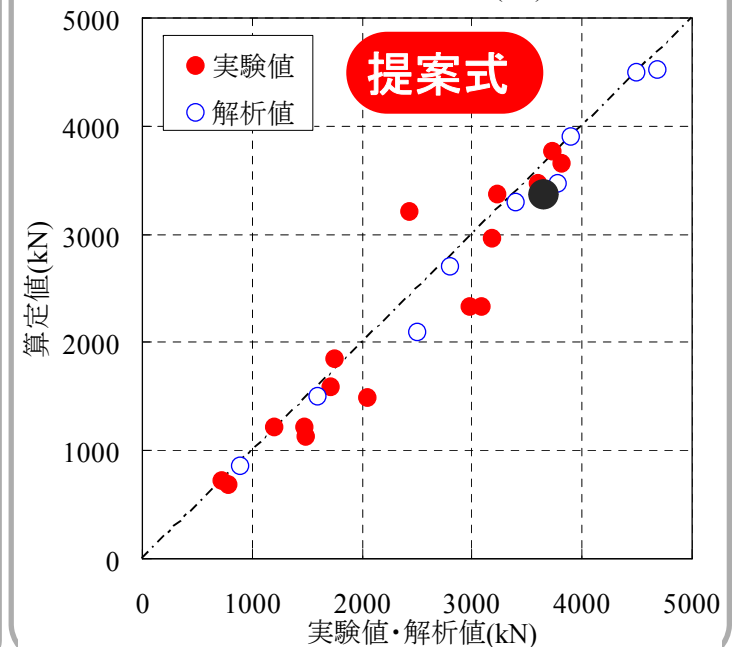
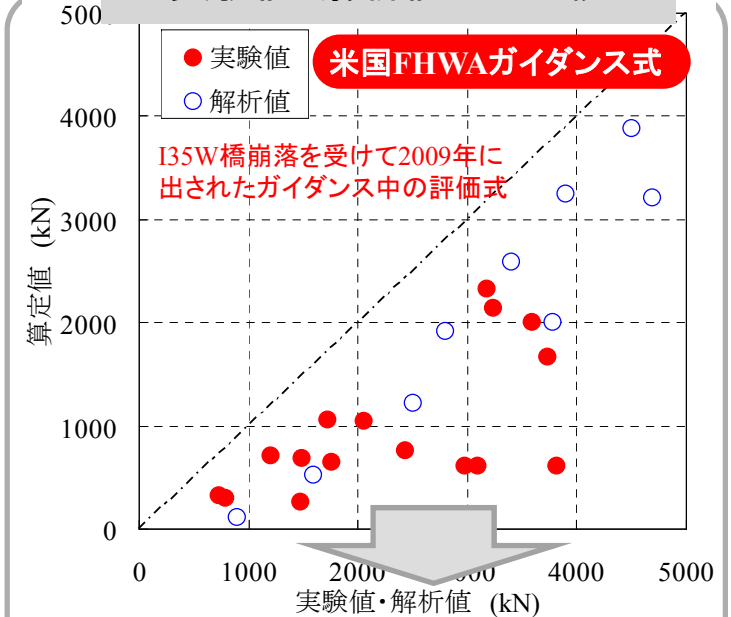
圧縮力を受けるガセットの耐荷力評価

- ・弾塑性FEMによりガセットの幾何学的形状が破壊性状、耐荷力に及ぼす影響を分析、評価式を提案
- ・既往の試験・解析結果等を踏まえ、評価式を検証
※既存の試験結果(健全体)に対し、試験値と評価式算定値は概ね一致

圧縮軸力に対する提案する評価式



実験値・解析値との比較

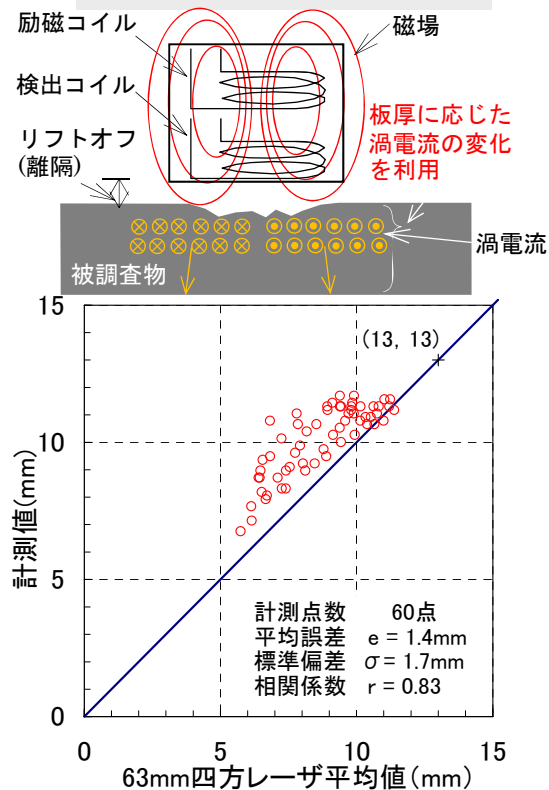


非破壊検査技術の腐食量計測への適用性評価

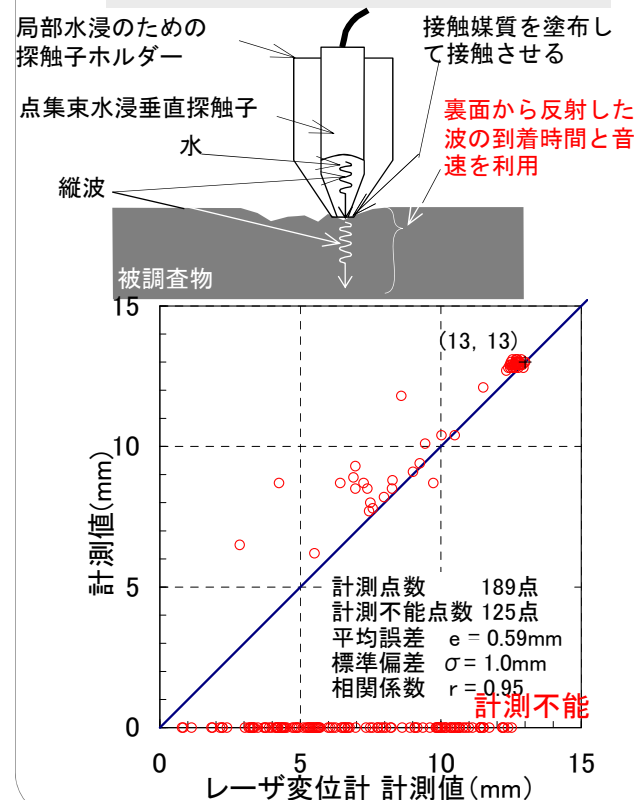
- ・他分野を含め既往非破壊技術を調査、可能性のある技術を抽出 ※厚い錆層上からの適用性を前提とした技術でないものも含む。
- ・腐食部材を用いた性能確認試験を行い、錆層上からの適用性を評価



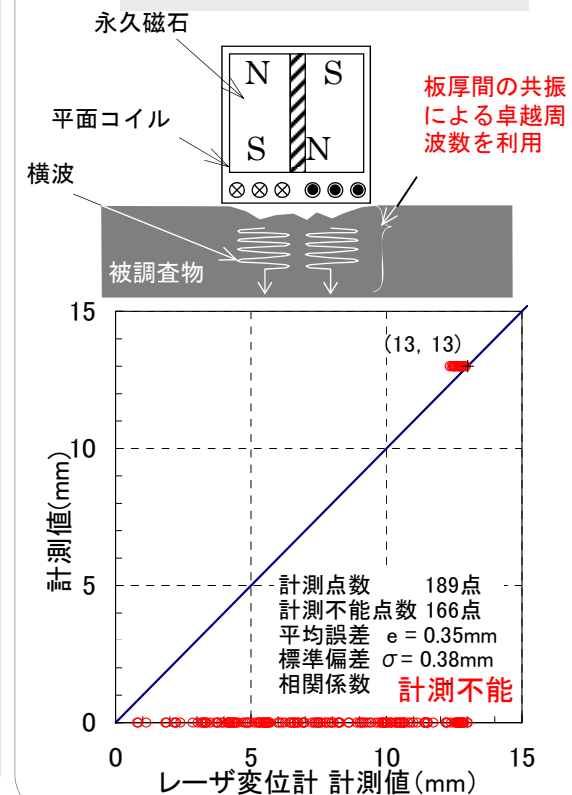
パルス渦流試験法



局部水浸探触子超音波法



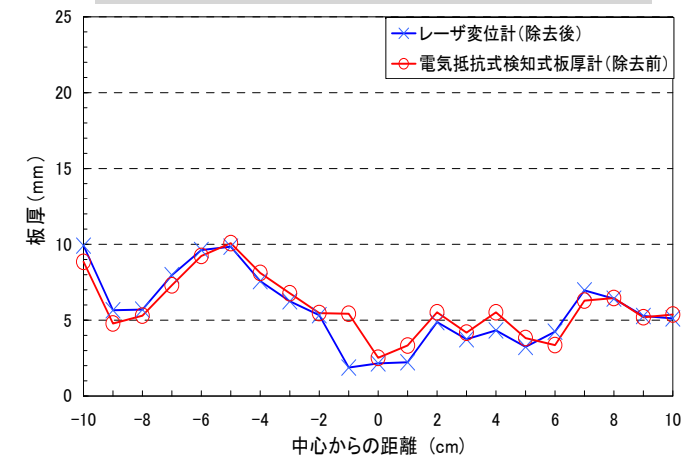
電磁超音波共鳴法



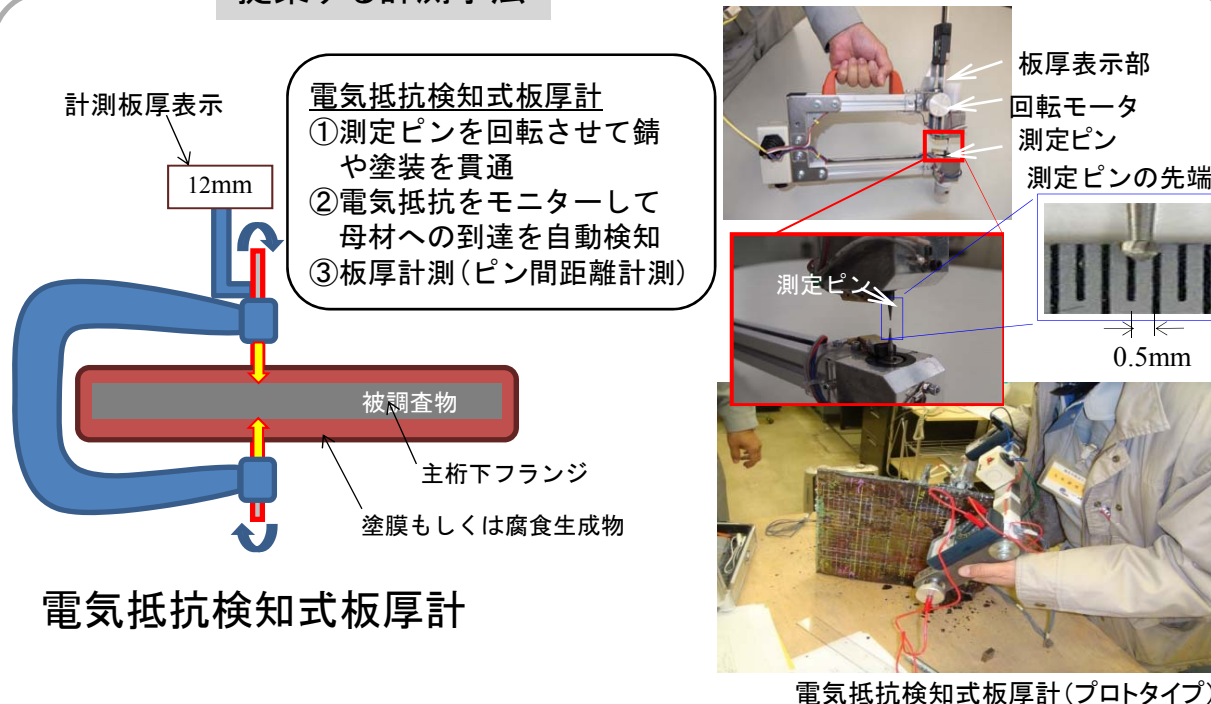
非破壊検査技術の腐食量計測への適用性評価

- ・既存技術では錆層上からの板厚計測には課題あり。
- ・残存板厚を簡易に直接的に計測する手法として、電気抵抗検知式の板厚計を提案、実験により検証

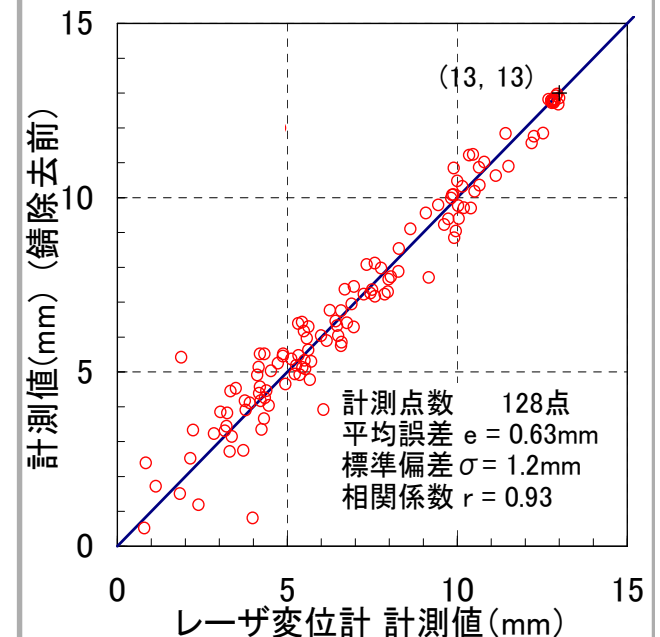
一断面内の腐食量の計測例



提案する計測手法



真値と計測値の関係



橋全体系の挙動評価のためのモデル化の検討

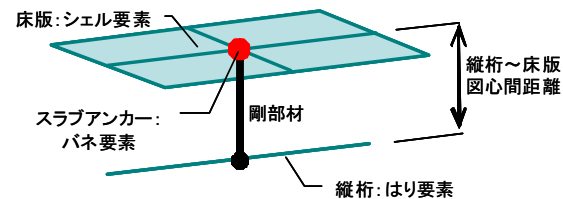
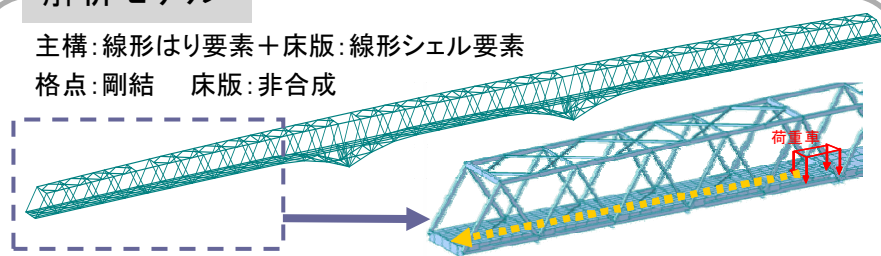
実橋計測(荷重車載荷試験)を行い、主構部材やトラス格点の挙動を把握するとともに、解析結果と比較

橋全体系の挙動(応答値)を算定するための実務レベルの解析モデルの適用性を検証

- ・主構部材の軸力は概ね一致
- ・格点部、床版と縦桁の結合条件や鋼材の腐食が軸力に与える影響は小さい

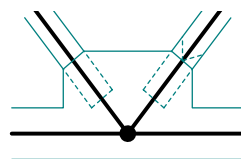
解析モデル

主構: 線形はり要素 + 床版: 線形シェル要素
格点: 剛結 床版: 非合成



スラブアンカーバネ値
(Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz) $\begin{cases} \text{合成: } (\infty, \infty, \infty, 0, 0, 0) \\ \text{非合成: } (0, 0, \infty, 0, 0, 0) \end{cases}$

床版と床組の結合条件



格点部の結合条件

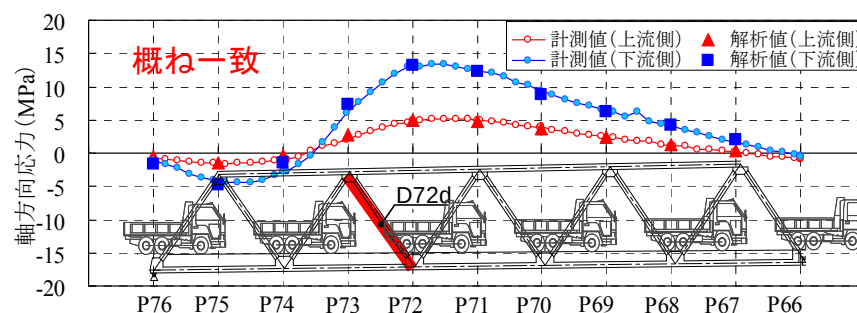


静的載荷試験



動的載荷試験

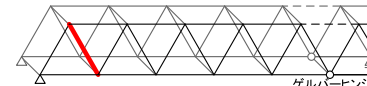
計測値と解析値の比較例



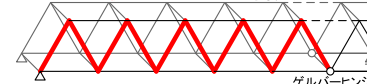
20tonf車1台の影響線載荷におけるD72d斜座位の軸方向応力

腐食の全体挙動への影響

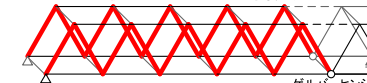
CASE1[2]: 1斜材のみ腐食(15%減[35%減])



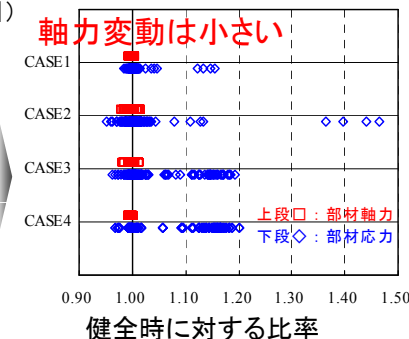
CASE3: 片側斜材全てが腐食(15%減)



CASE4: 両側斜材全てが腐食(15%減)



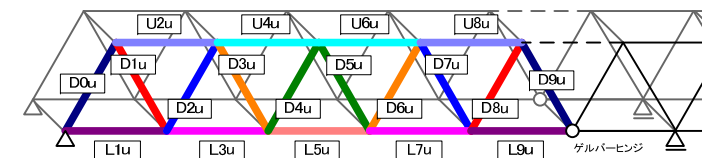
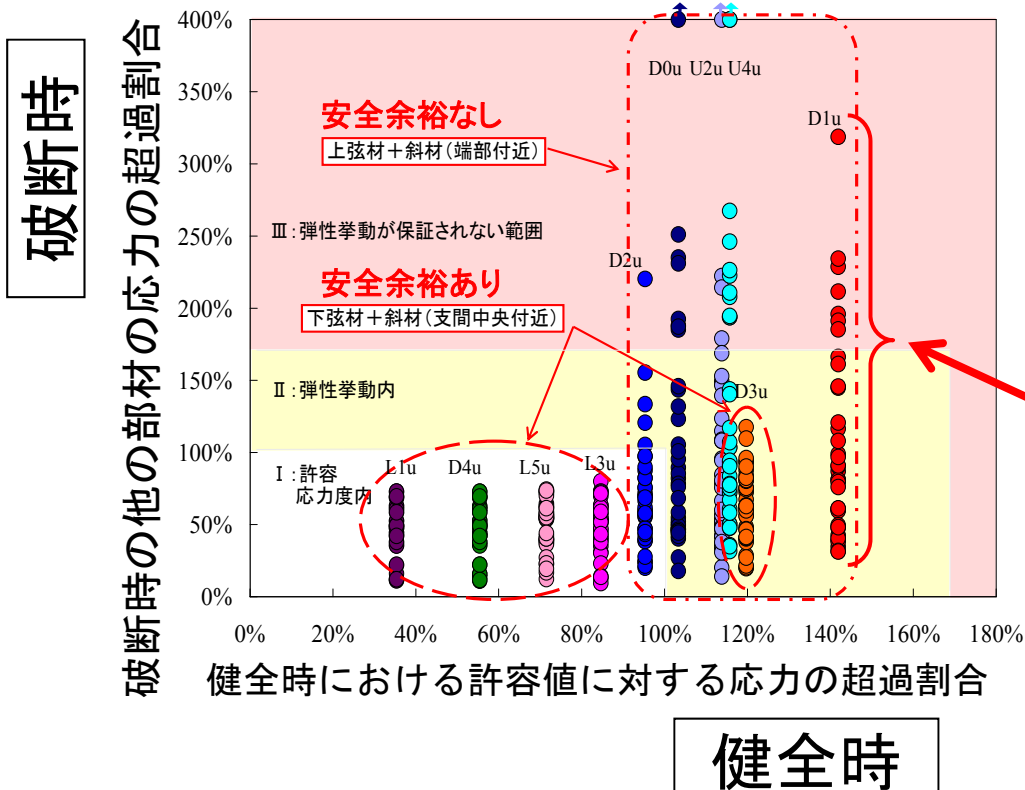
軸力変動は小さい



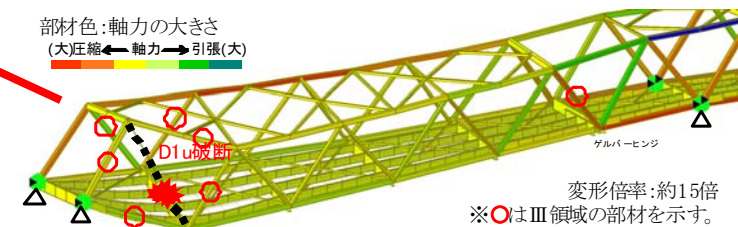
橋全体系の耐荷性能の評価

- ・各主構部材の破断が橋の全体挙動(他部材の安全性)に与える影響を評価
- 
- ・各部材の腐食欠損時の安全余裕を評価
(横組部材、床版とトラス主構との協同作用が耐荷性能に与える影響を把握)

主構部材の耐荷性能評価のケーススタディ



破断させる部材



D1u斜材破断時の変形状況

- ・荷重条件(B活荷重時)に対する各部材の現有耐荷力(横軸)と破断時(死荷重時)の他部材の耐荷力(縦軸)を表現。
- ・破断時の衝撃は未考慮。軸力及び曲げを考慮した応力度で評価。

おわりに ―今後の研究開発の取組み―

- 各構造の損傷事例に対する、調査から対策に至るまでの技術の体系化
- 維持管理の各段階を支える要素技術の開発、検証、標準化
- 新設橋へのフィードバック(耐久性の高い構造へ)

■点検・診断を支援する非破壊検査技術 ※必要とされる精度・信頼性を確保した技術

- ・目視困難な部位の損傷の状態把握
(吊材・ケーブル定着部、埋込部、RC床版内部等の状態把握)
- ・外観以外の診断に有用な状態把握(応力状態等)
- ・近接しにくい部位の点検の効率化
(近接可能な点検機材、遠隔計測、塗膜下・錆層下の状態把握)

■腐食への対応

- ・主 構: 損傷状態と健全度との対応付け、対策方法、優先性の評価、調査、診断、対策の各段階での留意事項の提示
- ・桁端部: 現場制約条件を考慮した環境改善、補修・補強技術の充実

■疲労への対応

- ・構造条件、交通条件による傾向分析⇒点検、診断への活用(対応の優先度)
- ・調査、診断、対策の各段階での留意事項の提示
- ・対策技術の充実(耐久性に対する信頼性の高い工法)

