

岩手大学における取組

鋼橋の損傷検出に向けた取り組み

岩手大学 理工学部 システム創成工学科
社会基盤・環境コース
大西 弘志

- 鋼部材における損傷の検出
 - 疲労損傷の簡易検出法の開発 ←
- コンクリート系床版の健全度判定
 - 衝撃振動試験を利用した判定法の開発 ←
- 鋼橋の全体系における異常の検出
 - 実橋梁を用いた計測実験
 - 橋梁モデルを用いた模型実験

背景

鋼橋の上部構造の主な損傷要因

- 鋼材の腐食
- 疲労損傷

➤ 疲労とは？

→ 変動荷重の繰り返し作用により亀裂が発生、破断の危険性

重交通を支える鋼橋ほど生じやすい

↓
長期的な維持管理のため

損傷の早期発見

適切な対処



疲労による亀裂発生例

出典：鋼橋（上部構造）の損傷事例，国土交通省

疲労損傷の簡易検出法の開発

背景

既存の点検手法

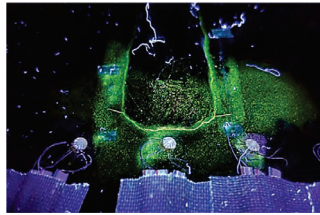
疲労亀裂に対する検査は目視点検が一般的
→必要に応じて非破壊検査

課題

- 点検者の経験や技量に左右される
 - 鋼板内部の損傷に対応できない場合がある
- 亀裂の見落としが起こりうる
→これらの課題に対処できる点検手法の確立

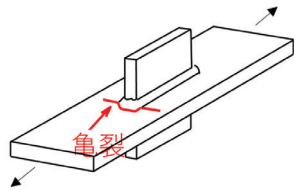


目視点検
出典：千葉市



磁粉探傷試験（非破壊検査）

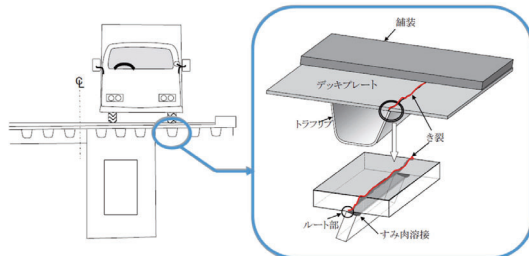
検討対象



面外ガセット溶接継手に発生する亀裂
出典：鋼橋の維持管理 H27.6.

特徴

- 疲労強度が低く
多くの疲労損傷事例



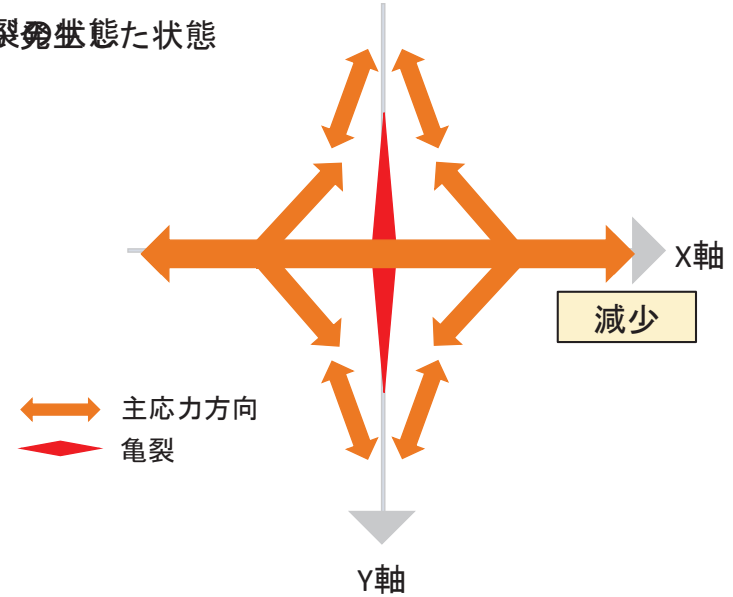
鋼床版Uリブに発生するデッキプレート貫通亀裂
出典：鋼部材の耐久性向上策に関する共同研究
-実態調査にも基づく鋼床版の点検手法に関する検討
国土技術政策総合研究所, (社)日本橋梁建設協会 H20.8.

特徴

- 床版下面からの目視点検では発見することが困難
- デッキプレートを貫通した場合、安全性に悪影響

検討手法

無亀裂発生状態



既往の研究

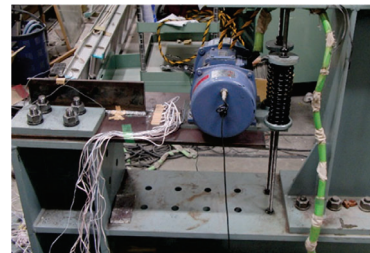
軸方向応力比

直交する2方向の応力値の比を確認することで
疲労亀裂の有無を判定することができるか検討

なぜ比をとるか？

一方向の応力値のみで亀裂の有無を判断する場合、
その時の対象構造物に作用している荷重を考慮する
必要があるが、無次元化することでより簡易的に

面外ガセット溶接継手



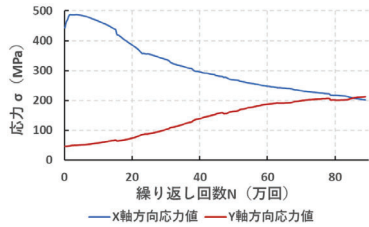
鋼床版Uリブ



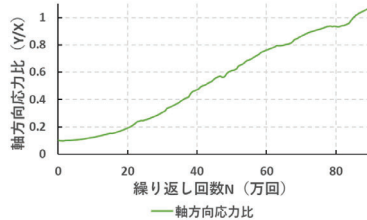
試験状況

既往の研究

面外ガセット溶接継手

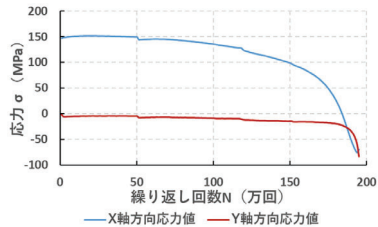


各軸方向の応力値の変動

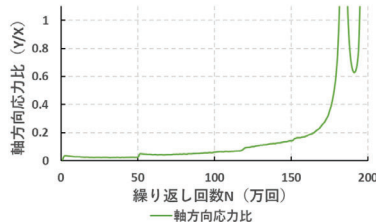


軸方向応力比の変動

鋼床版Uリブ



各軸方向の応力値の変動



軸方向応力比の変動

研究の目的

- 既往の研究で行われた振動疲労試験のひずみデータを基に各軸方向の応力振幅，応力振幅比の変動について検討
- FEM解析を行い，亀裂の発生・進展に伴う応力振幅比の変動について検討

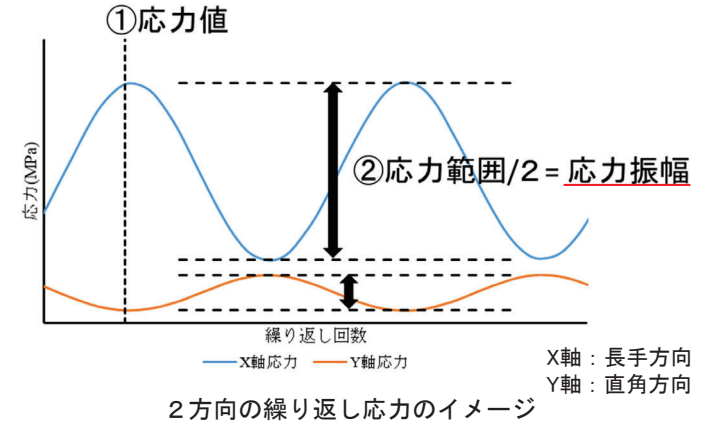


溶接部近傍にひずみゲージを貼り付け
応力振幅比を確認することで，亀裂の有無を判定する
手法の有用性を示す

本研究の手法

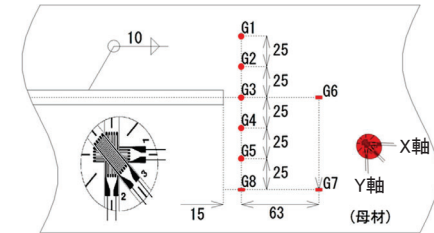
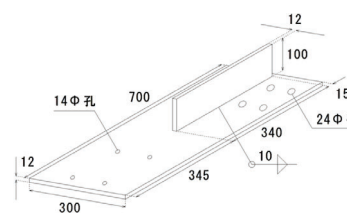
疲労現象を考える上では応力値ではなく
応力振幅が重要なパラメータ

➡ 応力振幅比の変動を用いて検討

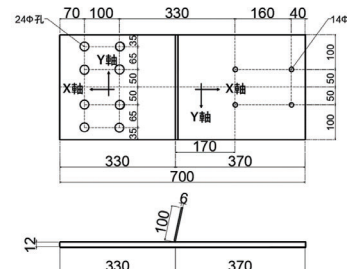


試験体概要

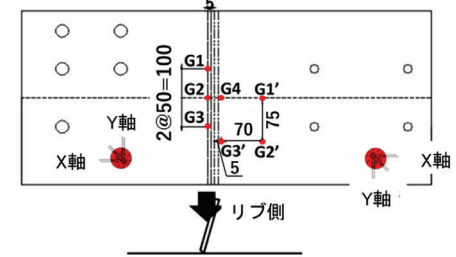
面外ガセット溶接継手



鋼床版Uリブ

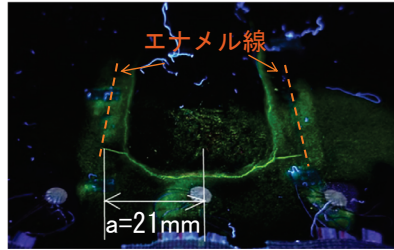
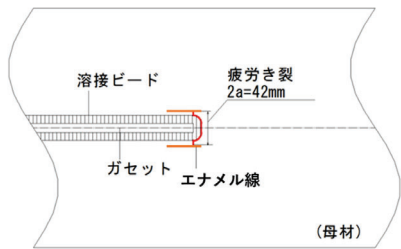


リブ外側 ← → リブ内側



疲労試験結果

面外ガセット溶接継手



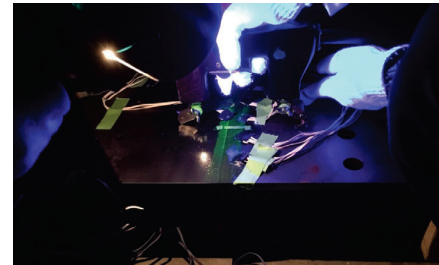
疲労亀裂発生状況

- 公称応力範囲と試験終了時の繰返し回数

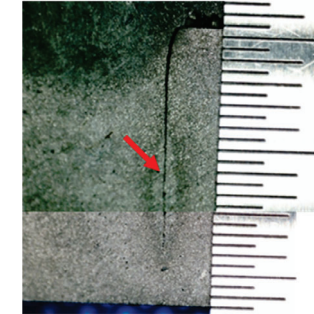
試験体番号	公称応力範囲 (MPa)	繰返し回数 (回)
No.1	119.7	154,800
No.2	80.0	640,000
No.3	100.3	370,400
No.4	101.5	240,300

疲労試験結果

鋼床版Uリブ



磁粉探傷試験実施状況



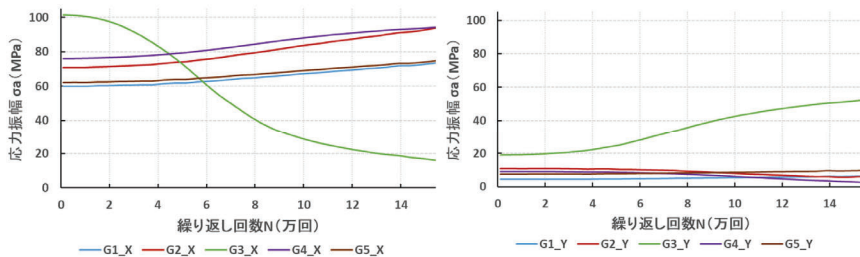
発生した疲労亀裂の一例

- 公称応力範囲と試験終了時の繰返し回数

試験体番号	公称応力範囲 (MPa)	繰返し回数 (回)
No.1	99.7	1,941,900
No.2	122.9	1,549,400
No.3	99.8	2,001,900

各軸方向の応力振幅の変動

面外ガセット溶接継手

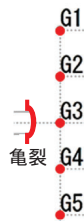


長手 (X軸) 方向

直角 (Y軸) 方向

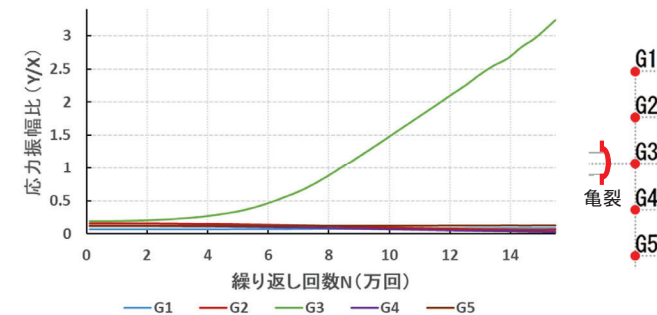
各軸方向の応力振幅の変動

- 溶接部近傍に位置するG3では各軸方向の応力振幅が大きな変動
- それ以外のゲージ位置では各軸方向の応力振幅は明確な変動が見られず



応力振幅比の変動

面外ガセット溶接継手



応力振幅比の変動

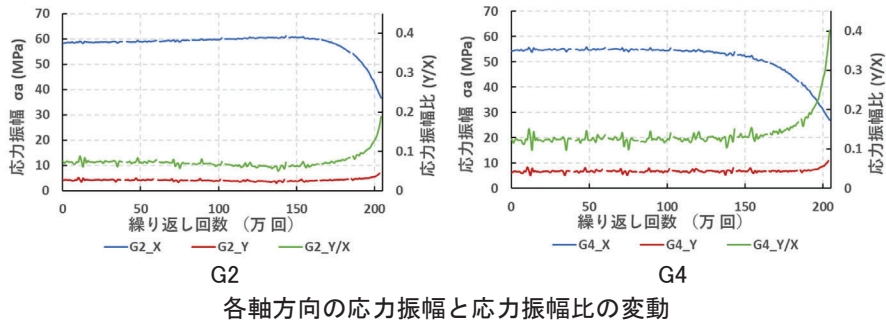
- 溶接止端部近傍のG3では応力振幅比は増加
- それ以外のゲージ位置では応力振幅比は変動せず



応力振幅比は亀裂近傍では変動するが亀裂から離れた位置では変動せず

応力振幅比の変動

鋼床版Uリブ

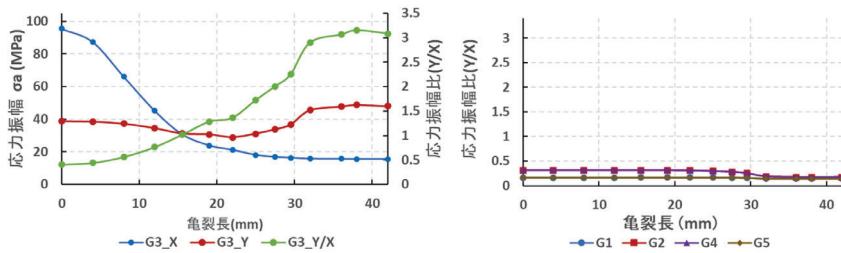


リブ外側のG2においてもリブ内側のG4同様に亀裂が発生・進展したことに伴う応力状況の変化により、応力振幅比の変動が確認された



解析結果

面外ガセット溶接継手



試験結果同様、G3位置では応力振幅比の変動が確認されたがそれ以外のゲージ位置では応力振幅比の変動は確認されなかった

次に、G3位置周辺における応力振幅比の変動を確認



解析概要

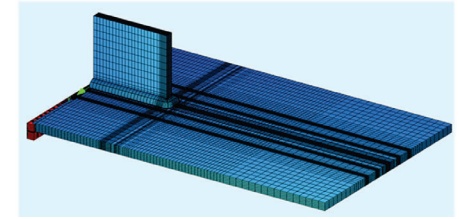
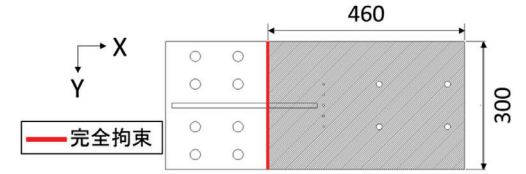
面外ガセット溶接継手

汎用有限要素解析プログラム SOFiSTiKを用いて解析

試験体の自由端側をモデル化
フレーム固定部を完全固定

材料特性

ヤング率: $E=210\text{kN/mm}^2$
ポアソン比: $\nu=0.3$



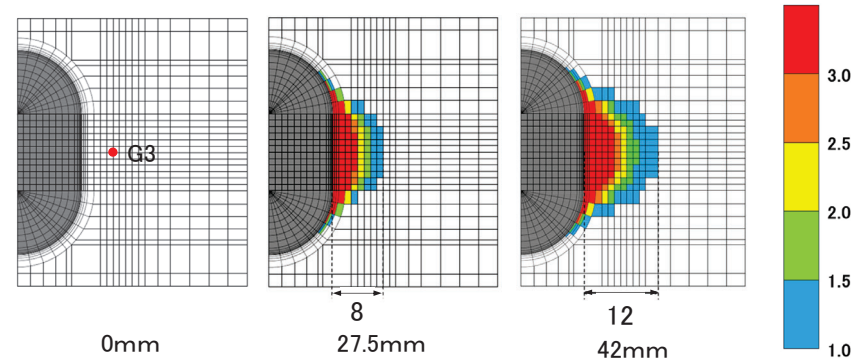
解析モデル

無亀裂状態から振動疲労試験で想定される最長の亀裂長である42mmまでの14パターンのモデル対象に解析
亀裂深さ b は亀裂長の半分 a に対して $b/a=1/3\sim 1/2$ になるように設定

溶接止端部近傍G3位置周辺の応力状況を中心に検討

解析結果

面外ガセット溶接継手



亀裂の発生・進展に伴い、応力振幅比の変動が確認される範囲が拡大する傾向が見られた

解析概要

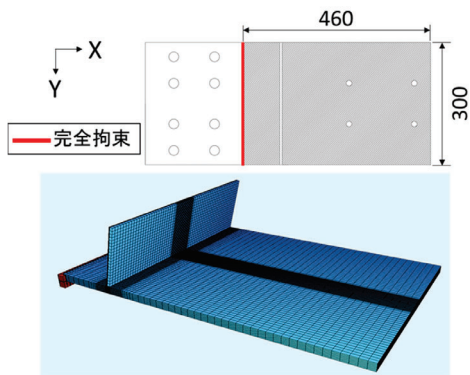
鋼床版Uリブ

汎用有限要素解析プログラム
SOFiSTiKを用いて解析

試験体の自由端側をモデル化
フレーム固定部を完全固定

材料特性

ヤング率: $E=210\text{kN/mm}^2$
ポアソン比: $\nu=0.3$



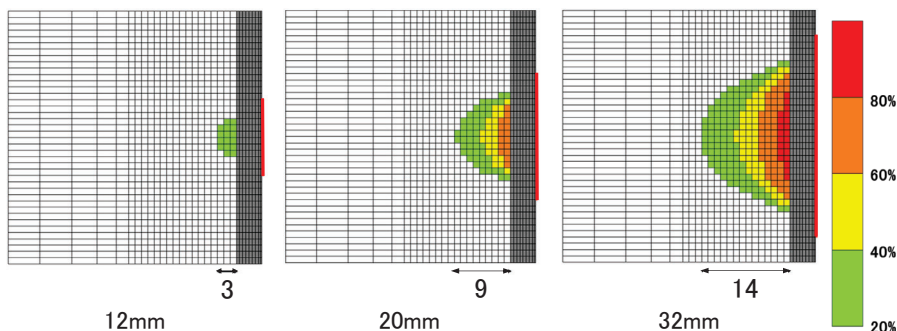
解析モデル

無亀裂状態から32mmまで4mmごとにモデルを作成し解析
亀裂長さ a は亀裂深さ b に対して $b/a=1/3\sim 1/2$ になるように設定

試験体中央リブ外側のG2位置周辺の応力状況を中心に検討

解析結果

鋼床版Uリブ



各解析モデルにおける応力振幅比の変動

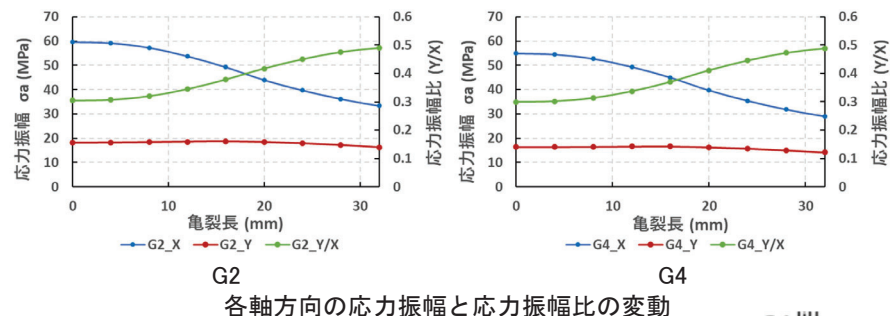
亀裂の発生・進展に伴い、応力振幅比の変動が確認される
範囲が拡大する傾向が見られた



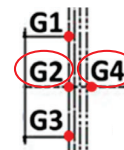
リブ外側位置においても応力振幅比の変動は確認できる

解析結果

鋼床版Uリブ



いずれのゲージ位置においても、亀裂の進展に伴い
応力振幅比が変動する傾向が確認された



次に、G2位置周辺における応力振幅比の変動を確認

結論

- 亀裂の発生・進展に伴う応力状況の変動により
応力振幅比が変動することが確認された
- 亀裂の進展に伴い、応力振幅比の変動が確認される
範囲が拡大する傾向が見られた
- 亀裂の発生箇所や亀裂の進展性状の違いにより
応力振幅比の値が異なるため、本手法を適用する際には
応力振幅比の変動に着目する必要

衝撃振動試験を利用した判定法の開発

研究背景



橋梁定期点検

出典:長崎県建設技術研究センター 業務案内 橋梁点検, 防災点検支援

橋梁定期点検

- 近接目視による点検が基本
(課題)
- 地方自治体において橋梁の保全に携わる技術者が少ない
- 点検範囲が限られる
- 点検者の技術・経験に結果が左右される

橋梁の老朽化に対し
簡単に実施できる定量的な
点検手法が必要

研究背景

振動試験

非破壊検査手法の1つ
構造物に振動を与えてその応答を計測

算出した振動特性(固有振動数など)から
構造物全体の健全度を判定する

局所的な損傷に対しては結果の変化が鈍く
判定が難しいことが多い



車両走行による振動試験



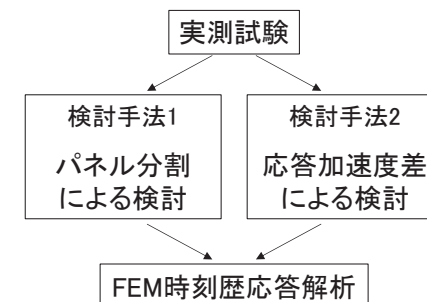
重錘落下(小型FWD)による振動試験

研究目的

衝撃振動試験を実施し応答加速度を計測



得られたデータから
橋梁床版の劣化状況を推定する



対象橋梁



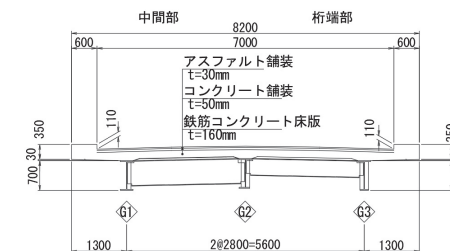
対象橋梁全景(左:床版取替前, 右:床版取替後)



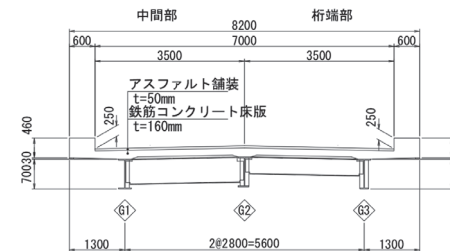
対象橋梁路面状況(左:床版取替前, 右:床版取替後)

対象橋梁

橋梁諸元	
上部構造	鋼合成単純H型桁橋
下部構造	逆T式橋台
基礎	直接基礎
主桁本数	3本
床版形式	RC床版
橋長	16,000mm
支間長	15,550mm
幅員構成	600+7,000+600=8,200m
斜角	83°
設計荷重	14t

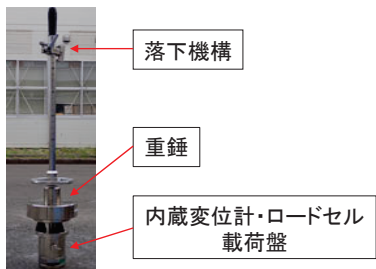


断面図(床版取替前)



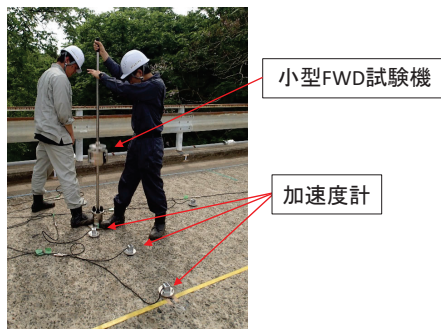
断面図(床版取替後)

試験概要



小型FWD試験機

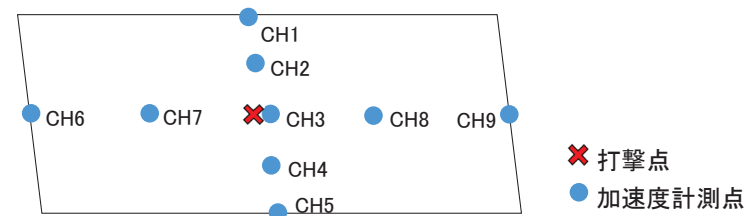
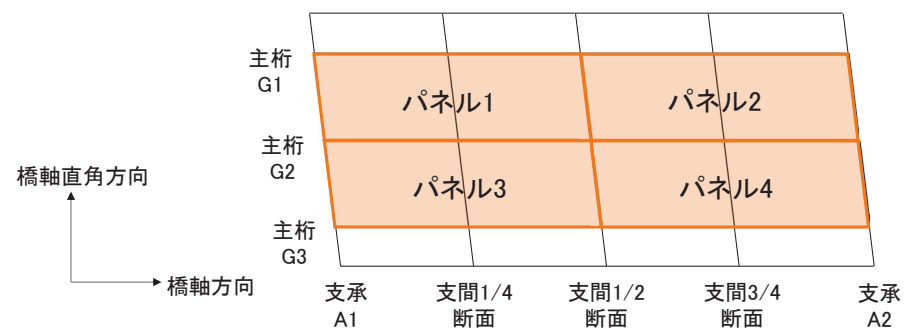
重錘をガイドに沿って落下させる
安定した衝撃力
小型で可搬性が良い



実測試験

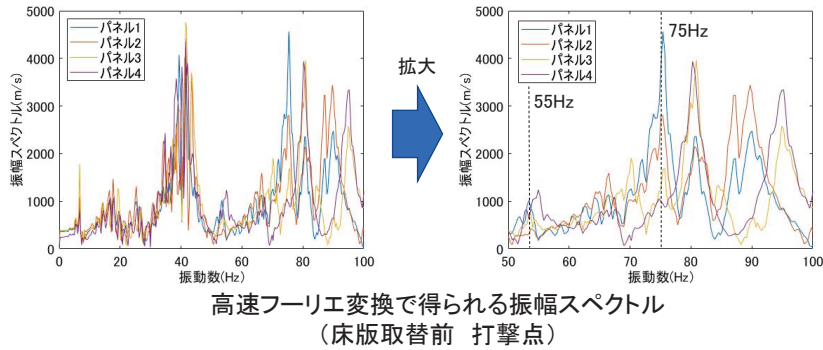
小型FWD試験機と加速度計を併用
衝撃振動による鉛直方向の加速度
を複数点で同時計測

パネル分割による検討



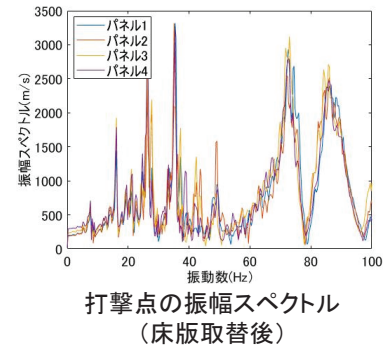
✕ 打撃点
● 加速度計測点

パネル分割による検討



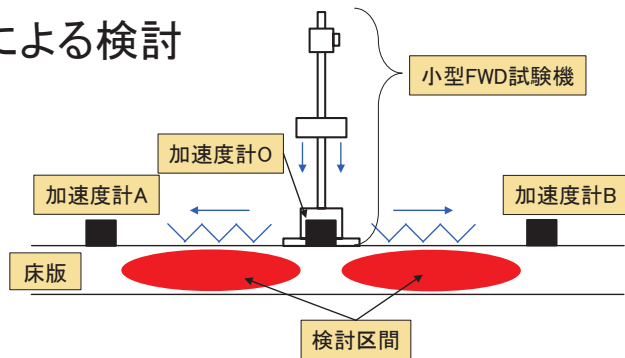
- パネルごとに卓越振動数が異なる
→各パネルの剛性や支持状態が異なる
- パネル4と他パネルの差異がやや大きい
→パネル4で応答振動が異なる可能性

パネル分割による検討



- 床版取替前は卓越振動数にばらつきがある
- 床版取替後はスペクトルの卓越が一致
- 不均一に劣化した床版が
一様な剛性の床版に取替えられた

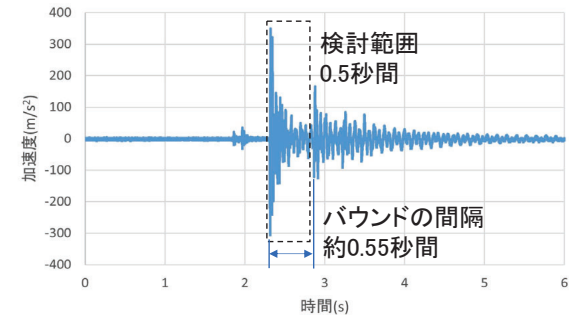
応答加速度差による検討



- 加速度計に挟まれた区間が検討部分
- 両区間の剛性が同じ → 加速度計AとBの計測値は同じ
- 片方が剛性低下 → 加速度計AとBの計測値が異なる

- 本研究では
- 打撃点の加速度計Oとの計測値の差分O-AとO-Bを比較
- 計測点ではなくその間の区間を対象とする
→計測点数以上の位置での健全度評価

応答加速度差による検討

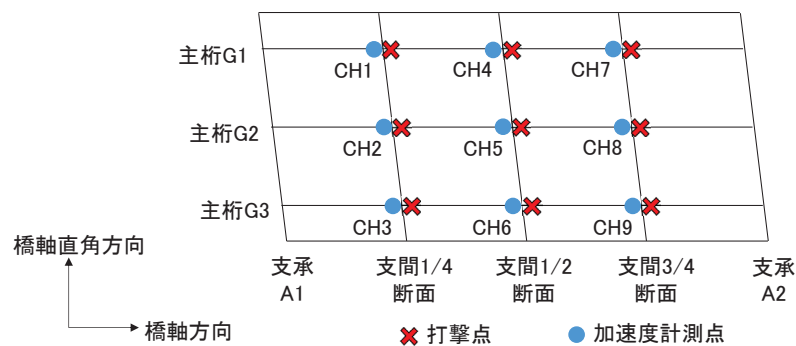


小型FWD試験で得られる加速度波形と計測範囲

加速度差分の一致度を相関係数で評価

相関係数の絶対値 $ r $	0~0.2	ほぼ相関なし
	0.2~0.4	弱い相関
	0.4~0.7	中程度の相関
	0.7~1	強い相関

応答加速度差による検討

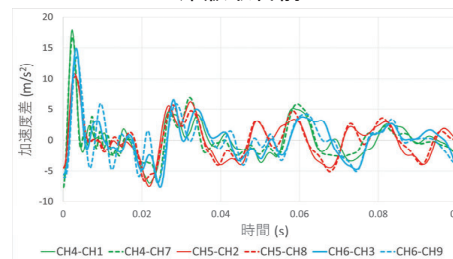


小型FWD打撃点及び加速度計測点の配置図

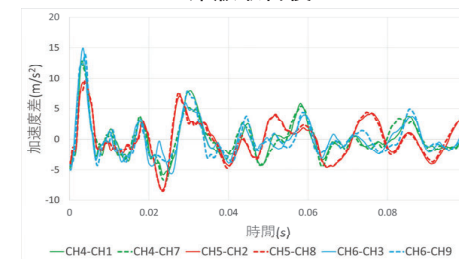
応答加速度差による検討

主桁方向区間の加速度差(支間1/2点打撃)

床版取替前



床版取替後



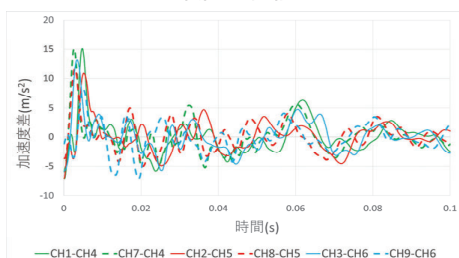
	CH4-CH1	CH4-CH7	CH6-CH3	CH6-CH9
CH4-CH1		0.87	0.69	0.60
CH4-CH7			0.68	0.58
CH6-CH3				0.86
CH6-CH9				

	CH4-CH1	CH4-CH7	CH6-CH3	CH6-CH9
CH4-CH1		0.93	0.80	0.84
CH4-CH7			0.80	0.78
CH6-CH3				0.90
CH6-CH9				

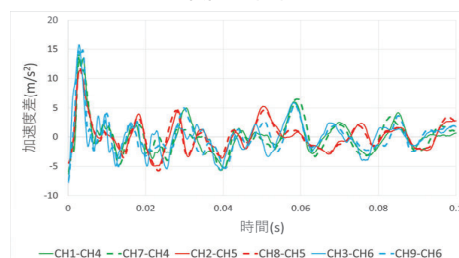
応答加速度差による検討

主桁方向区間の加速度差(支間1/4、3/4点打撃)

床版取替前



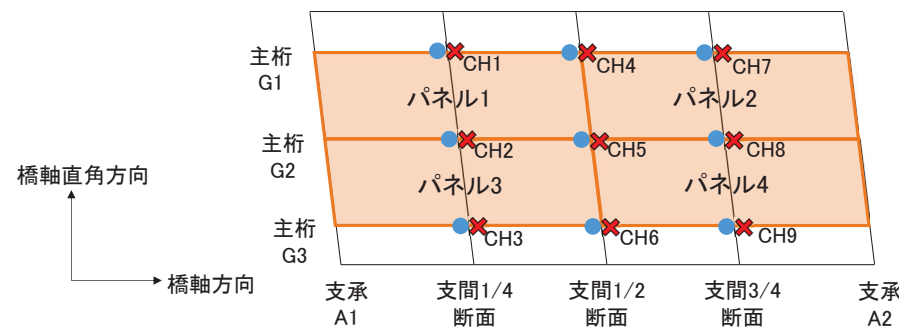
床版取替後



	CH1-CH4	CH7-CH4	CH3-CH6	CH9-CH6
CH1-CH4		0.42	0.64	0.21
CH7-CH4			0.68	0.27
CH3-CH6				0.17
CH9-CH6				

	CH1-CH4	CH7-CH4	CH3-CH6	CH9-CH6
CH1-CH4		0.84	0.68	0.86
CH7-CH4			0.75	0.77
CH3-CH6				0.77
CH9-CH6				

応答加速度差による検討



パネル分割による検討

パネル4が他パネルとスペクトルの差異

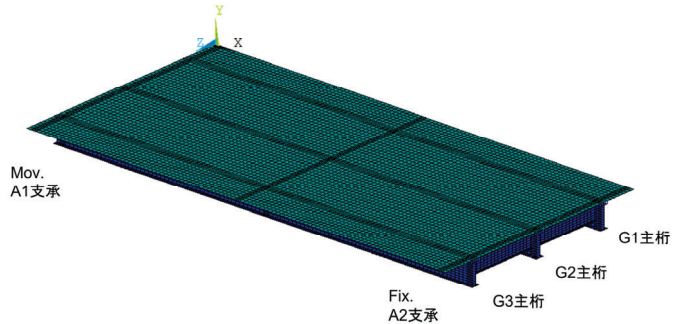
応答加速度差による検討

区間CH9-CH6と他区間の相関が弱い



両検討方法から同様の結果
相対的な剛性の低下

時刻歴応答解析

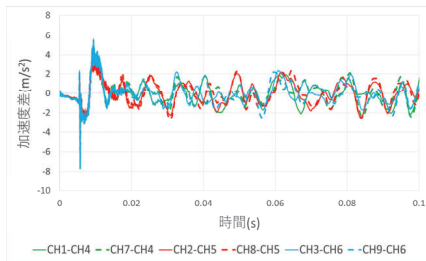


対象橋梁上部工の3次元FEMモデル

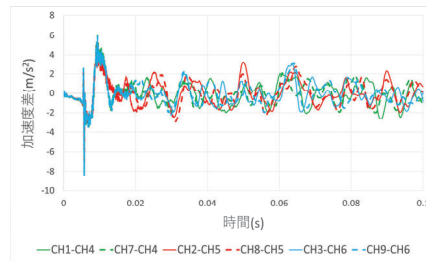
物性値

	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
RC床版	31,000	0.167	24.5
鋼材	200,000	0.300	77.0

時刻歴応答解析



ヤング係数100%



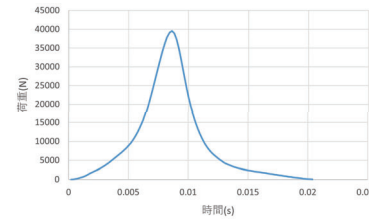
ヤング係数70%

支間1/4, 3/4点打撃時の主桁方向区間の加速度差

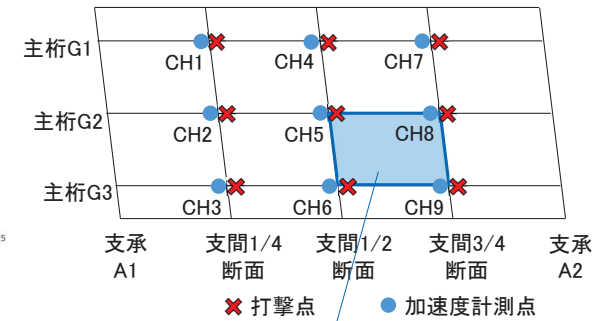
外主桁上の区間の組み合わせによる相関係数

剛性	CH1-CH4 CH7-CH4	CH3-CH6 CH9-CH6	CH1-CH4 CH3-CH6	CH1-CH4 CH9-CH6	CH7-CH4 CH3-CH6	CH7-CH4 CH9-CH6
100%	0.60	0.63	0.62	0.90	0.90	0.62
90%	0.60	0.62	0.57	0.86	0.89	0.64
80%	0.57	0.62	0.51	0.78	0.82	0.61
70%	0.49	0.63	0.46	0.72	0.71	0.54

時刻歴応答解析



入力した時刻歴荷重



剛性低下範囲

剛性低下範囲のヤング係数

健全状態との比率	ヤング係数 (N/mm ²)
100%	31,000
90%	27,900
80%	24,800
70%	21,700

実測試験と同様の9点で加振・計測

剛性低下範囲のヤング係数低下により局所的な劣化の影響を検討

まとめ

- 床版をパネル分割し、それぞれに振動試験を実施した結果、床版取替前は各パネルのスペクトルにばらつきがあることからパネルごとの剛性が異なることが推測された。
- 応答加速度の差分の一致度を相関係数を用いて検討した結果、取替前の床版では相関が弱く、剛性が一様ではないと推測された。
- 両検討で床版取替による改善効果が確認された。また、他部位との差異が大きいと推測された部位が一致しているため、これらの検討は剛性の異なる部分の推定に利用できると考えられる。
- FEMモデルを作成し時刻歴応答解析を行った結果、剛性低下に伴う応答加速度差の相関係数の低下が確認された。今後は橋梁形式や劣化位置・規模などの影響を検討する必要があると思われる。