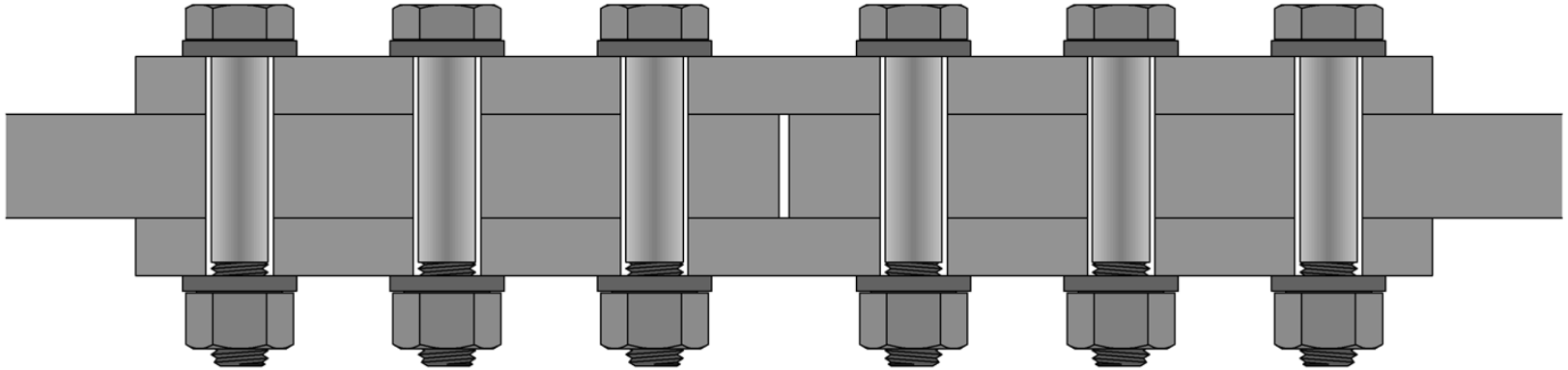
【第18回新都市社会技術セミナー】

「既設橋梁における高力ボルト継手の実態調査と安全性評価および点検方法の検討」



令和３年10月4日(月)

プロジェクトリーダー：大阪市立大学大学院　教授　山口隆司

目次

1. 研究背景
2. 研究目的
3. 1年目の研究成果について
4. 2年目の研究成果について
5. 本年度(最終年度)の研究目標について

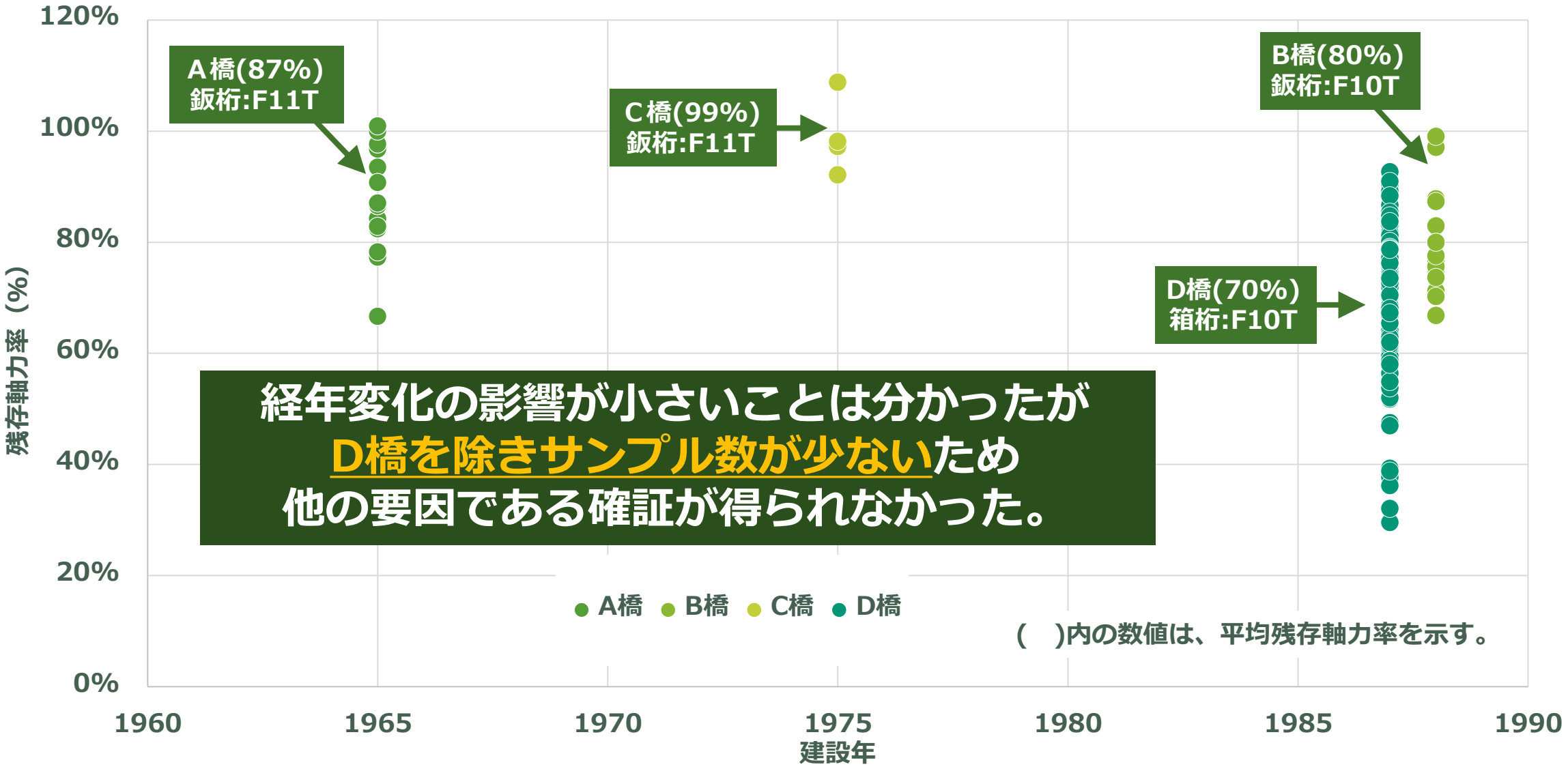
1. 研究の背景

高力ボルトの**軸力管理**は鋼橋をはじめ様々な分野で緩みや強度などの安全性とその信頼性の指標として重要視されている

高力ボルトは、リラクゼーションによる軸力低下を考慮し、ボルト締付け時には設計軸力に対して**10%の増し締め**を行い軸力低下を補完

近畿地方整備局管内における供用から30年～50年経過した鋼橋の**高力ボルトの残存軸力を4橋調査**　(※2020年まで計8橋調査)

■ 事前調査した高力ボルト残存軸力の経年変化



経年変化の影響が小さいことは分かったが
D橋を除きサンプル数が少ないため
他の要因である確証が得られなかった。

2. 研究プロジェクトの目的

①残存軸力の実態把握および軸力低下の原因調査

長期間供用されたより多くの鋼橋から高力ボルトの残存軸力調査し、軸力低下の範囲や軸力低下に影響を及ぼす要因を分析し、日本国内の多様な環境下における高力ボルトの軸力低下予測を行う。

②供用中の鋼橋に関する安全性評価

ボルト継手の残存軸力が予想以上に低下している場合を想定し、FEM解析等によりボルト継手の軸力抜けがどの程度までなら安全上、問題がないかを検証し、その対策方法を検討する。
（例）増し締めなどで対応可能か？など

③簡便な締付け軸力管理手法の提案

高力ボルトの本締め後に全ての高力ボルトに所定の軸力が導入されているかを確認する方法はない。導入軸力を測定する方法としては高力ボルト頭部にひずみゲージを使用する方法や超音波測定方法による直接的な測定方法が一般的であり、簡便で間接的な調査方法として画像処理によるひずみ評価方法を試行し高力ボルトの点検手法を提案する。

3. 1年目の研究成果について

①残存軸力の実態把握および軸力低下の原因調査

■長期間供用された箱桁橋（E橋）と鈑桁橋（F橋）から高力ボルトの残存軸力調査を調査し、軸力低下の範囲や軸力低下に影響を及ぼす原因調査を行った。

・箱桁橋（E橋）の継手部で使用されているF10Tの六角高力ボルトをウェブ46本，下フランジ47本の計93本を調査を行った。

・箱桁橋の残存軸力率の全体平均値は88%であった。全93本の内、16本(17%)は設計ボルト軸力（205kN）を満足しており、変動係数の平均値CVは、15.3%であった.

・ウェブと下フランジの部位の違いによる、高力ボルトの残存軸力率の差は小さく、なんらかの傾向を確認できなかった。また、主桁中立軸近傍と下端近傍を比較すると、中立軸からの距離の影響による、残存軸力率にも大きな差は見られなかった.

・高力ボルトの締付け管理方法には一般的にはトルク法を使用することが多いが、どの管理方法を適用したかの記録は残っていなかった。

①残存軸力の実態把握および軸力低下の原因調査

- 鈑桁橋（F橋）の継手部で使用されているS10Tのトルシア形高力ボルトをウェブ49本，下フランジ43本の計92本を調査を行った。

- 鈑桁橋の残存軸力率の全体平均値は100%であった。全92本の内、49本(53%)は設計ボルト軸力（205kN）を満足しており、変動係数の平均値CVは、8.8%であった。

- ウェブと下フランジの部位の違いによる、高力ボルトの残存軸力率差は小さく、なんからの傾向は確認できなかった。また、主桁中立軸近傍と下端近傍を比較すると、中立軸からの距離の影響による、残存軸力率に大きな差は見られなかった。

- 4本の残存軸力のボルトに関しては、母板と連結板の孔ズレが大きく、孔とボルト軸部が強く接触しており、軸力低下との関連があると考えられる。

- 箱桁橋と鈑桁橋を比べ、箱桁橋のバラツキが大きい理由は六角高力ボルトとトルシア形高力ボルトの締付け機械の違いに影響があると考えられる。

- 一般的な締付け機械の入らない箇所の高力ボルトでは、軸力が入っていないものもあった。

②供用中の鋼橋に関する安全性評価

■高力ボルト摩擦接合継手のすべり/降伏耐力比βやフィラーの有無、ボルト配置をパラメータとしたFEM解析を行い、局所的な軸力抜けがすべり挙動に及ぼす影響について検討

・1行からなる短冊状の継手による解析では、ボルト軸力低下位置がすべり係数に及ぼす影響は小さい。

・1行3列継手においては、すべり係数の低下率に着目した場合、すべり先行型に対して降伏先行型継手の方が、よりボルト軸力低下位置の影響を受ける。

・フィラーを有する1行3列継手のすべり係数は、前述の1行3列継手よりも低下率が高い。
また、フィラーを有する場合でも、すべり先行型の場合、ボルト軸力低下位置がすべり係数低下率に与える影響は小さい。

・砲台配置継手において、局所的なボルト軸力低下を有する継手のすべり係数の低下は、すべり先行型で3.6%、降伏先行型で6.8%となり、全体のボルト軸力低下率より大きい。
また，相対変位測定位置近傍のボルト軸力が低下した場合に、すべり荷重が最も小さい。
降伏先行型継手において、すべり係数低下率が大きくなったのは、引張荷重作用下におけるボルト軸力の低下が大きいためであり、その影響は1行3列継手よりも大きい。

③簡便な締付け軸力管理手法の提案

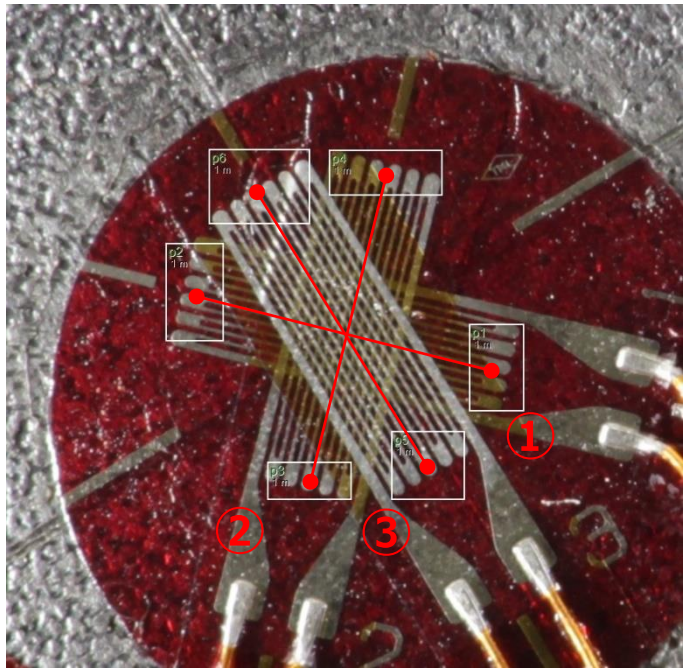
■現在、一般的な高力ボルト締付け方法であるトルク管理法では、高力ボルト締付け日毎に、ボルト首下長さ80mmの決められた長さのみをキャリブレーション試験で確認し、検定している。実際には，様々な長さのボルトを締め付けるが、その管理は、ナットに示されたマーキングの回転量により定性的に管理を行っている。そのため新たな管理方法として、画像処理によるひずみ評価方法を提案

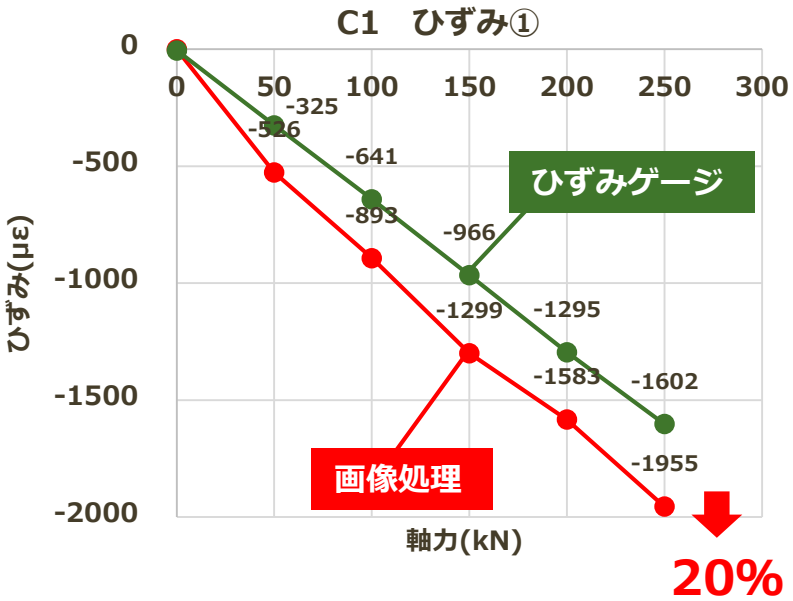
・専用の軸力確認試験機を用いて、ボルト頭頂部の中央に貼付けた３軸ひずみゲージによる計測と画像計測を並行して行った結果、算定値には強い相関関係があるものの、ひずみゲージ3方向の全てにおいて一様に20%程度大きく表示されることが分かった。

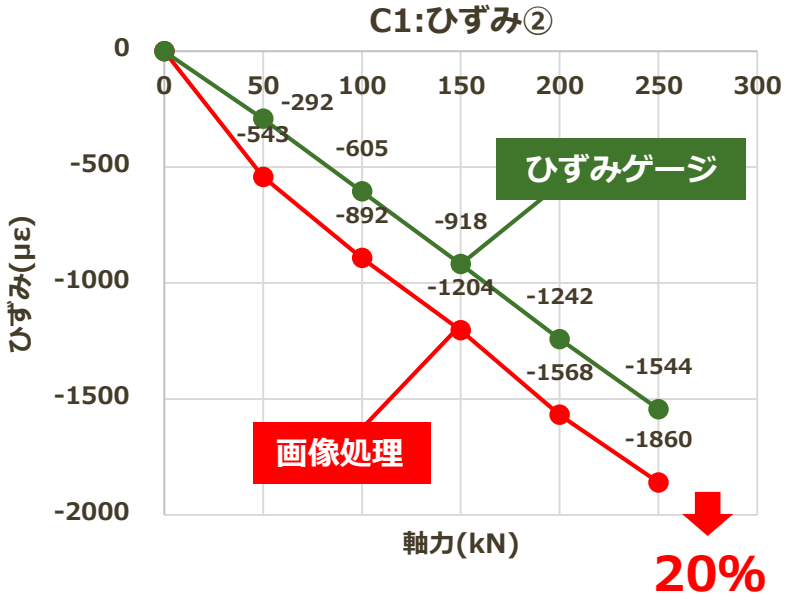
・この原因については、高力ボルトに軸力を与えた時に頭頂部がクレーター状に変形することによる３次元的な変形が影響していると考えられる。

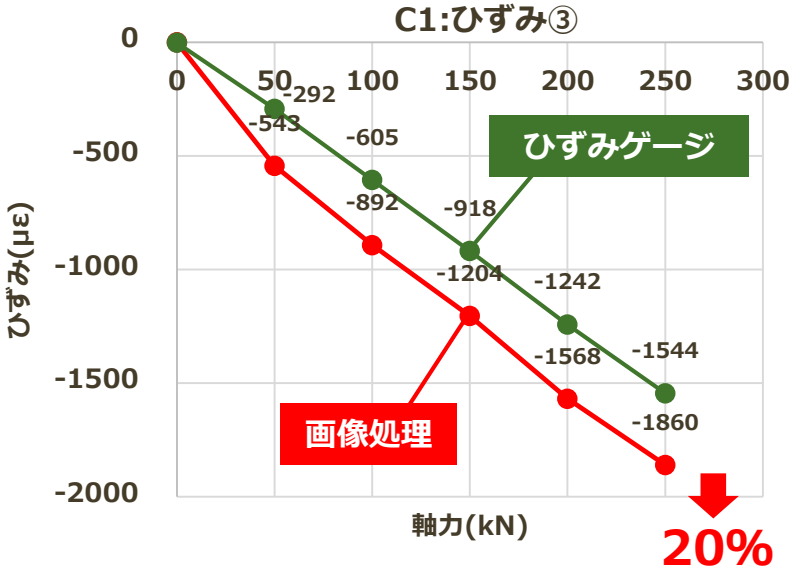
③簡便な締付け軸力管理手法の提案

■ひずみゲージと画像測定の差









2019年度は約20%程度、画像測定の方が高めの値になる傾向

立体的な変位の影響からくるものではないかと考えられる

4. 2年目の研究成果について

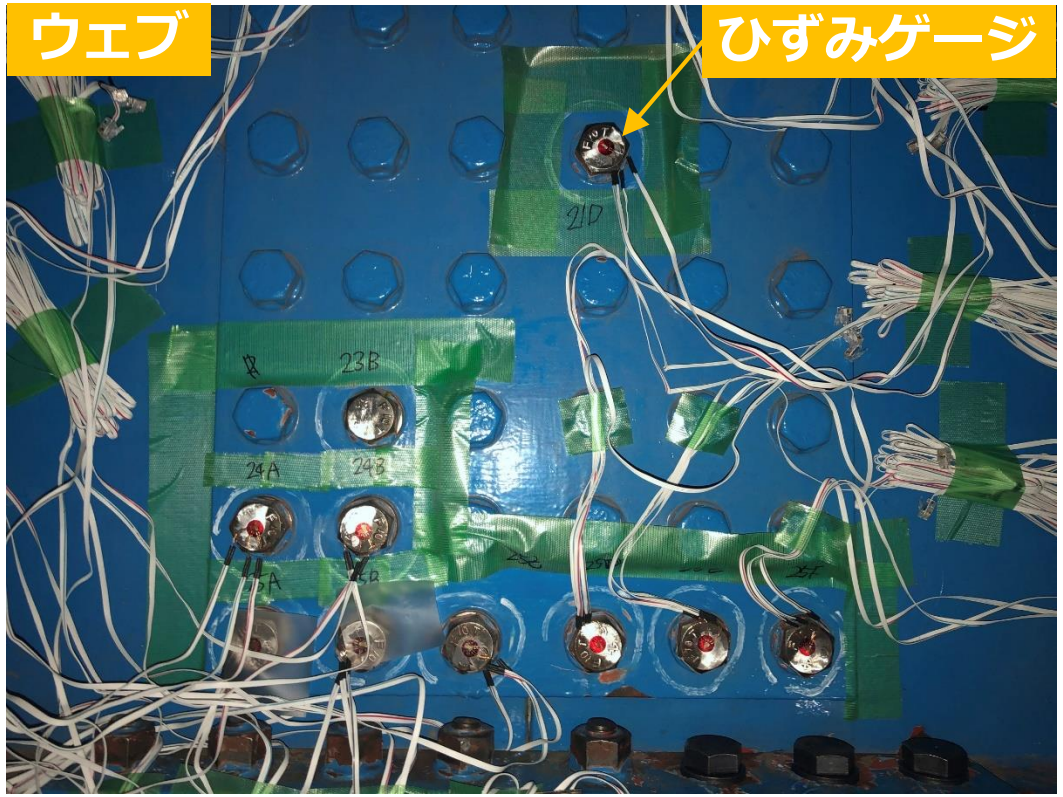
①残存軸力の実態把握および軸力低下の原因調査

・橋梁形式：2径間連続鋼非合成箱桁橋
・橋長：112.0m
・支間長：55.45m＋55.45m
・建設年：1991年（29年）
・ボルト強度：F10T
・ボルト径：M22（A3塗装系）
・接合面仕様：無塗装

・橋梁形式：2径間連続鋼非合成箱桁橋
・橋長：112.0m
・支間長：55.30m＋55.45m
・建設年：2012年（8年）
・ボルト強度：S10T
・ボルト径：M22（C5塗装系）
・接合面仕様：塗装（F11,F12）

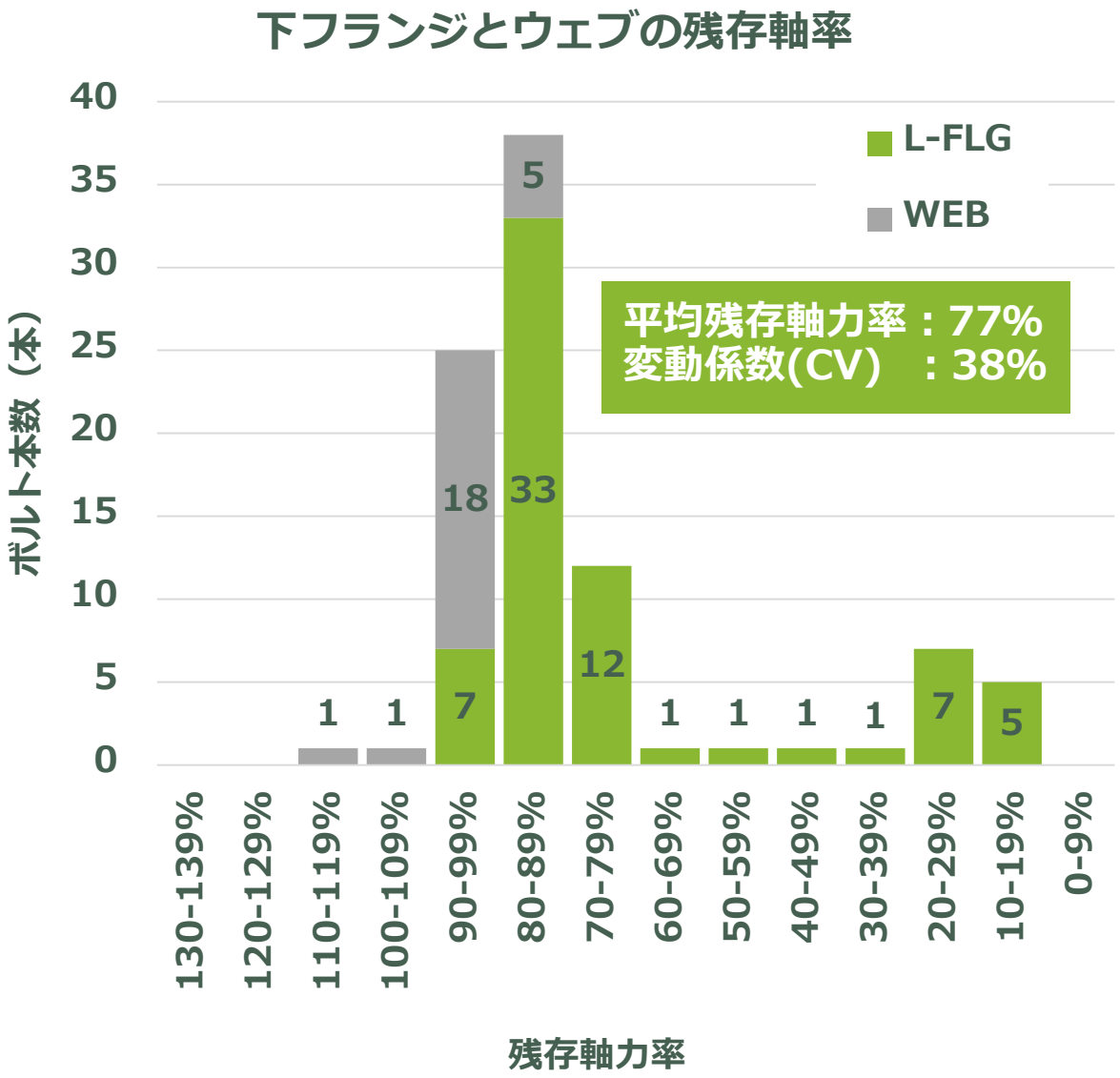
■G橋 サンプリング状況（六角高力ボルト：F10T）

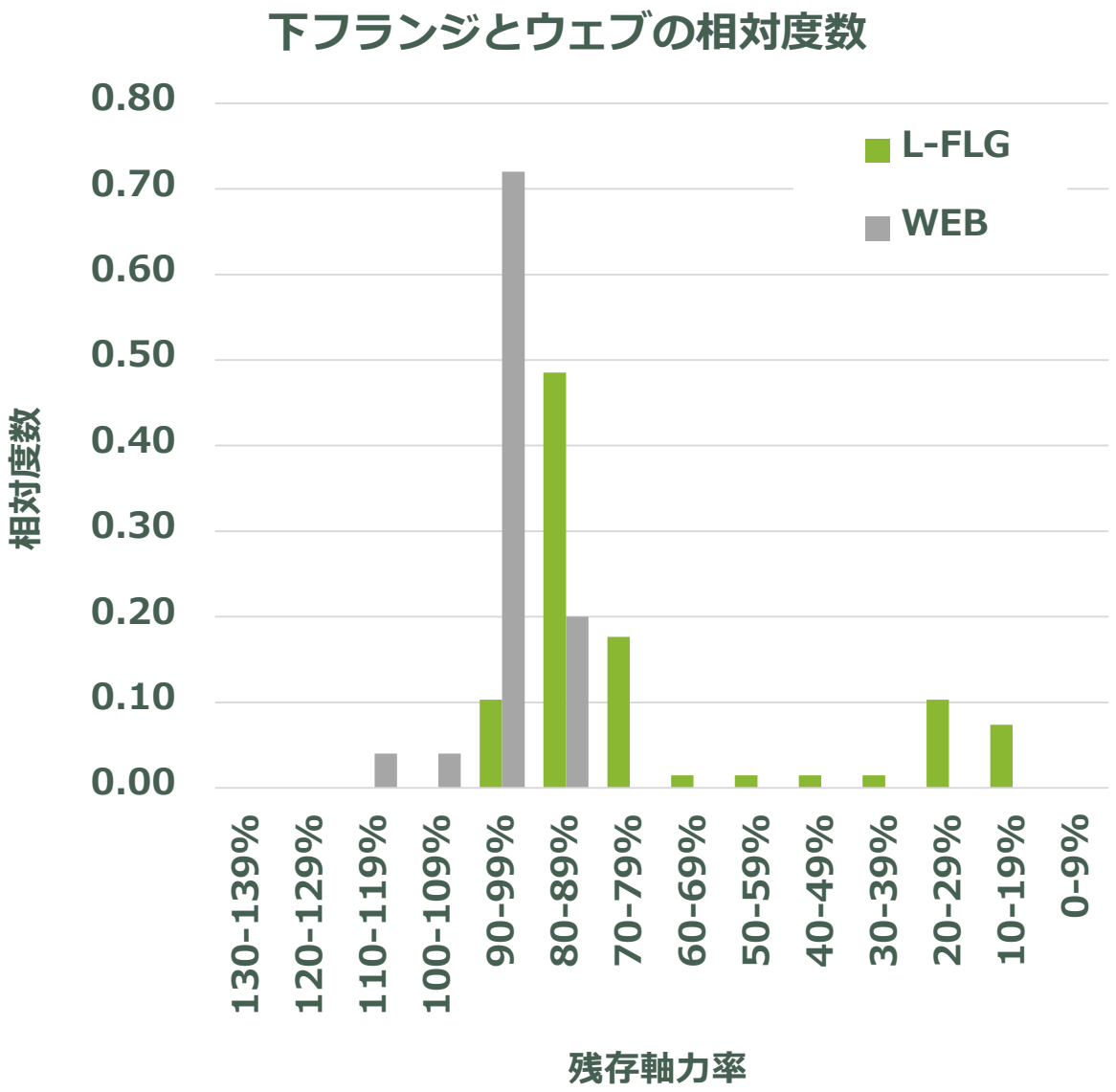
●ひずみゲージ設置状況



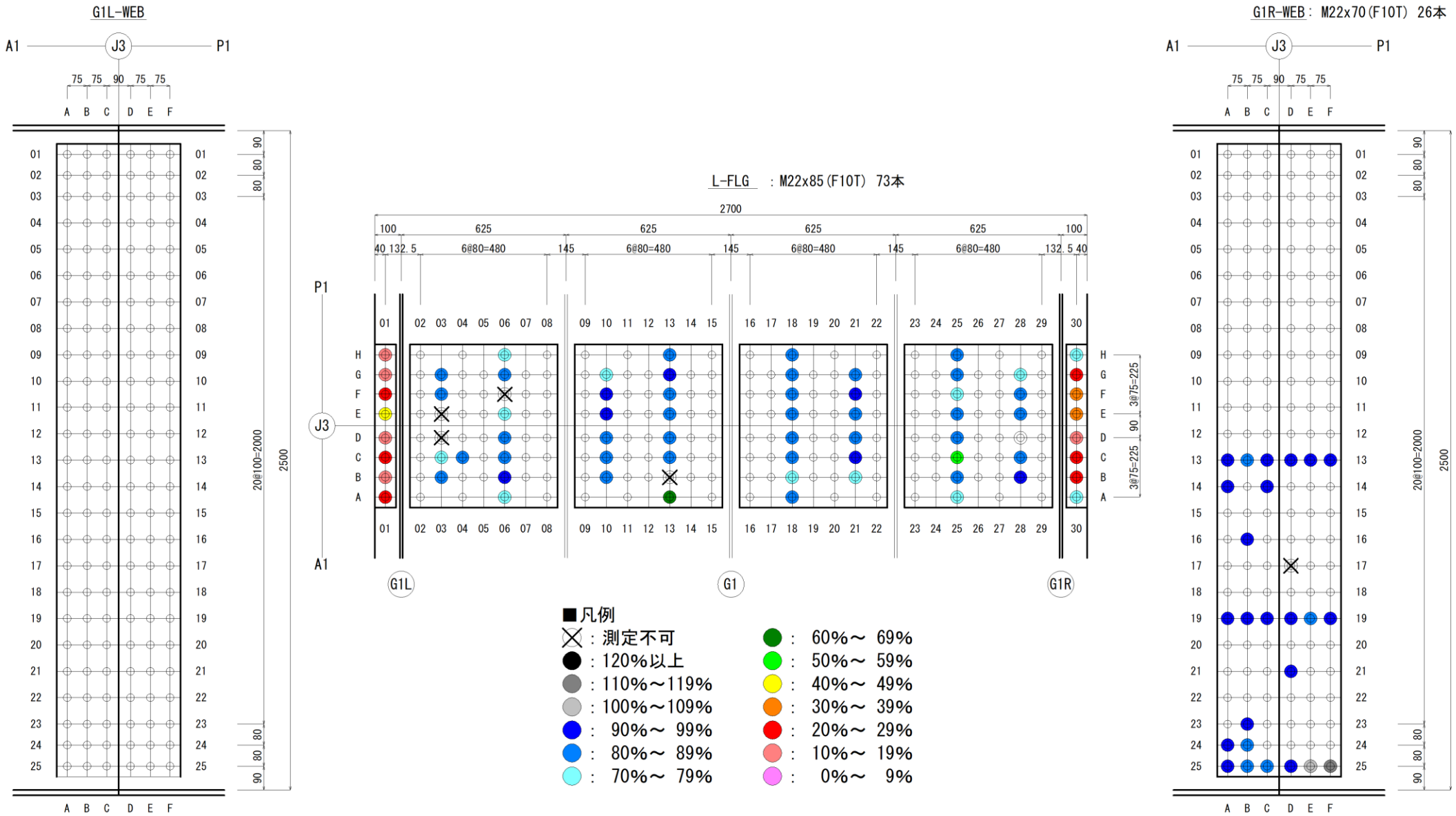
●ボルト抜取り状況

■G橋　残存軸力調査結果（六角高力ボルト：F10T）



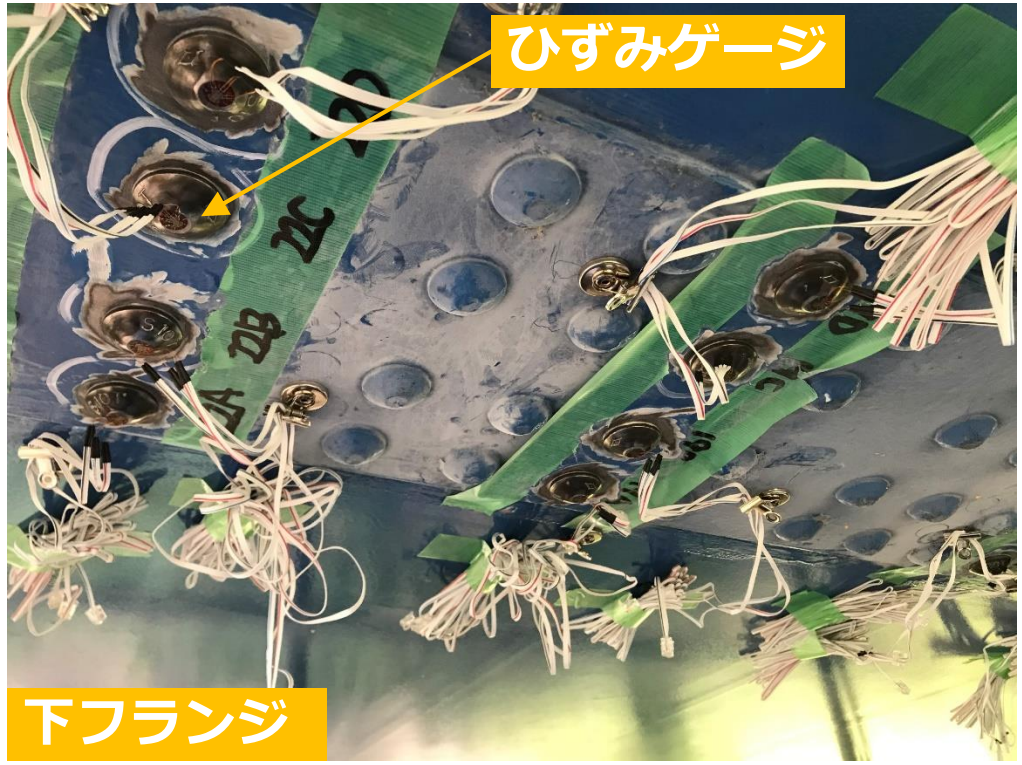


■G橋 残存軸力率分布図（六角高力ボルト：F10T）



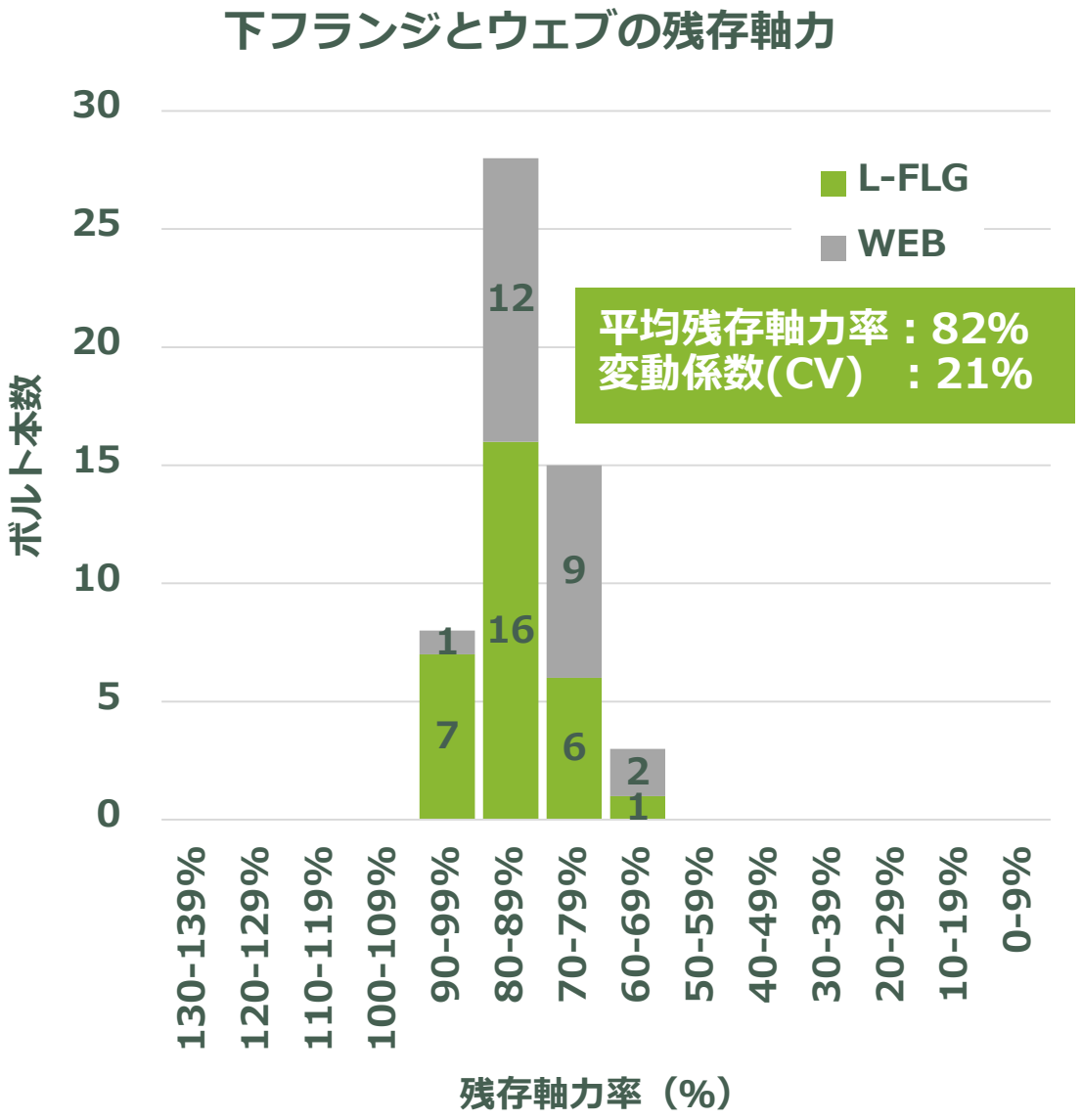
■H橋 サンプリング状況（トルシア形高力ボルト：S10T）

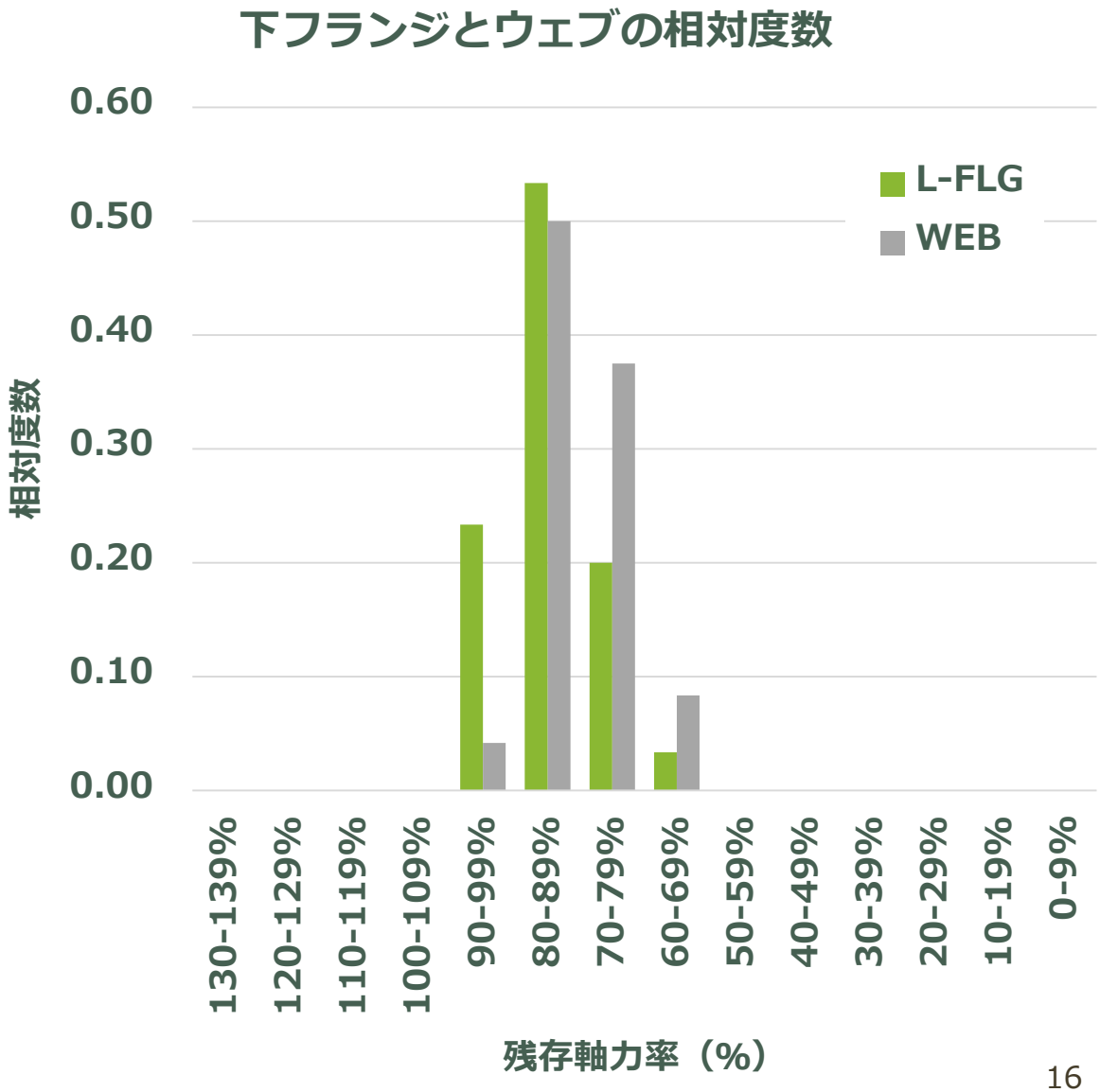
●ひずみゲージ設置状況



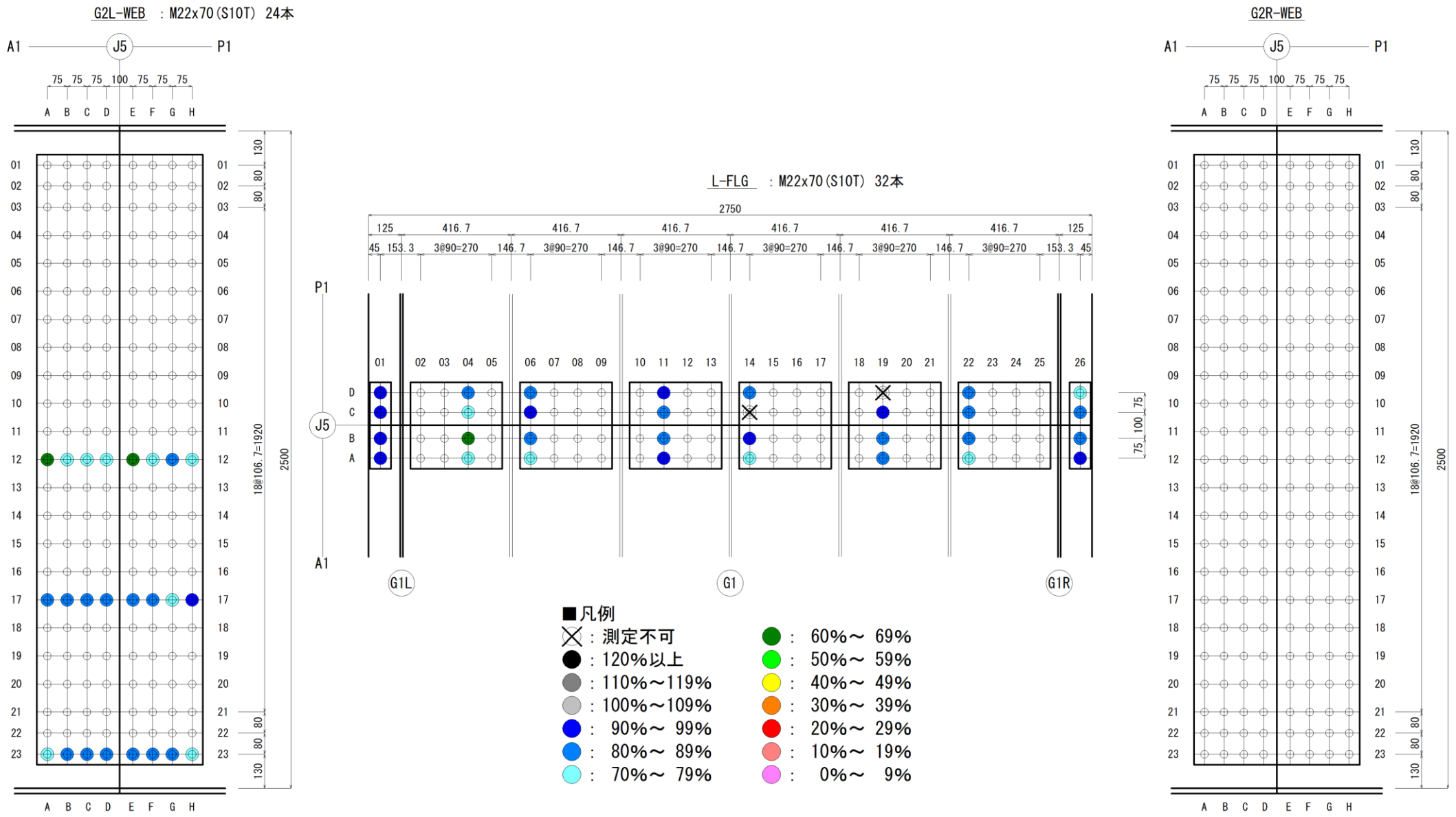
●ボルト抜取り状況

■H橋　残存軸力調査結果（トルシア形高力ボルト：S10T）



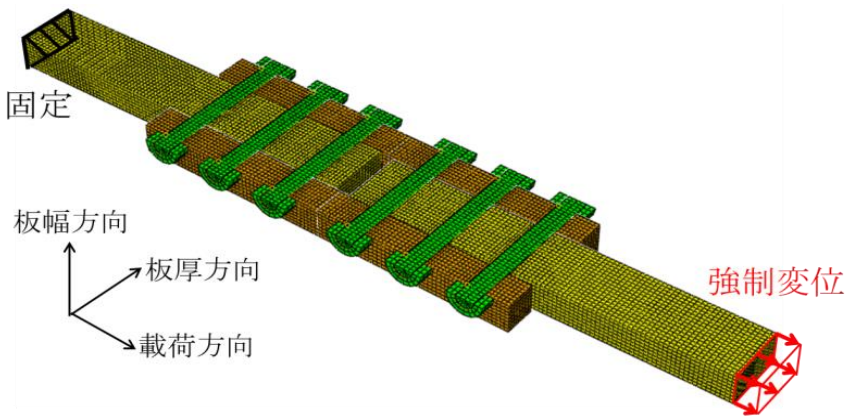


■H橋 残存軸力率分布図（トルシア形高力ボルト：S10T）

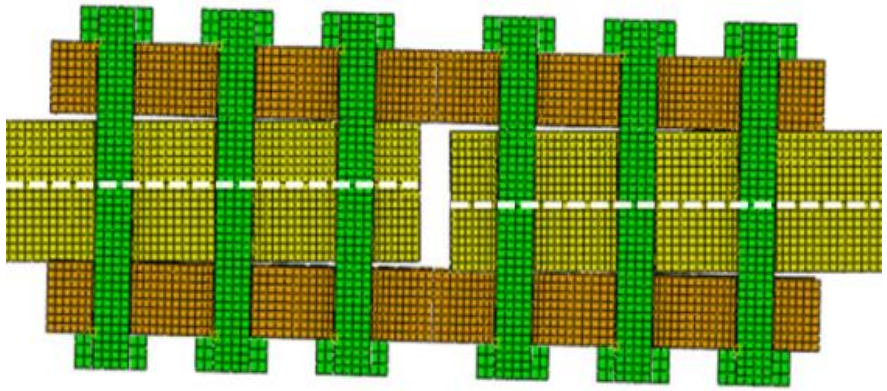


②高力ボルト摩擦継手の限界状態評価法の検討

■目違いを有する高力ボルト摩擦接合継手の力学的挙動



a)全体図



b)拡大図

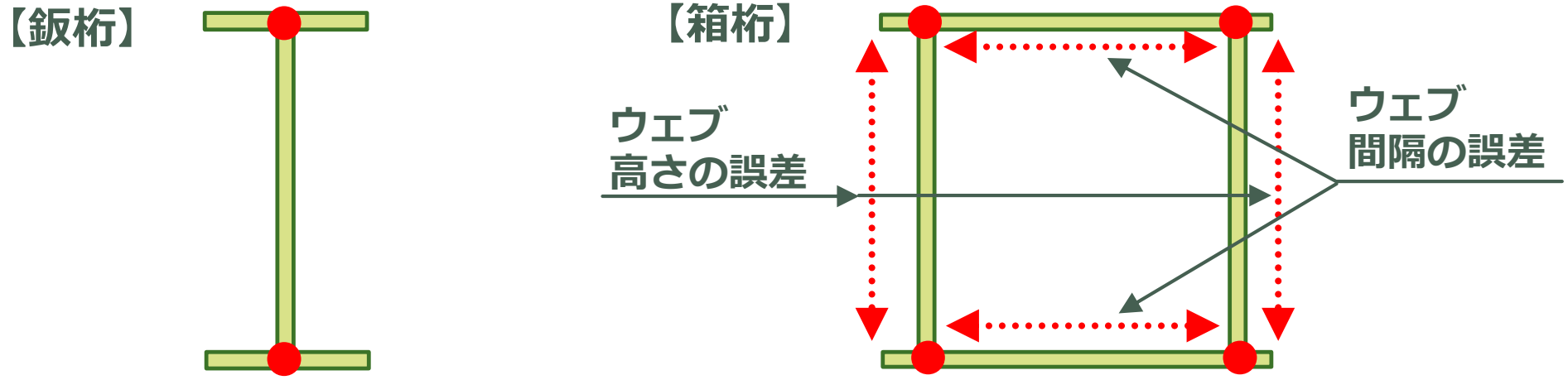
図-1:解析モデル形状

【結果】

継手部に肌隙がある場合、高力ボルト軸力は母材の変形に吸収され、母材と連結板が密着するまで接合面の接触力が発生しない。すなわち、接合面の肌すきが解消されるまで、高力ボルト摩擦接合としての性能を発揮せず、接触力も減少していることから、所定のすべり耐力を発揮できない。これは被接合部材の板厚が大きく、拘束条件が厳しいほど顕著になることがわかった。また、この場合、新たにボルトを締付けることで、既に締め付けを完了したボルトの軸力を低下させることがわかった。

■今後の検討内容

鈑桁よりも箱桁の高力ボルト継手でボルト軸力が低下する理由について検討



鈑桁よりも箱桁でボルト軸力低下が顕著となる理由を検討した結果、箱桁では、断面ねじり剛性が高く、製作および施工誤差により目違いがある場合、拘束が大きく、ボルト軸力が低下しやすい状態にあることが考えられる。

目違のある鈑桁および箱桁の連結部に対して、高力ボルト継手の締め付け手順を再現した全断面FEM解析を行い、軸力低下性状の原因検証を行う必要がある。

③ボルト軸力の画像マッチング法によるボルトのひずみ評価方法開発

【高力ボルト頭部のひずみ分布特性を調べ、測定方法実用化の基礎とする】

測定概要

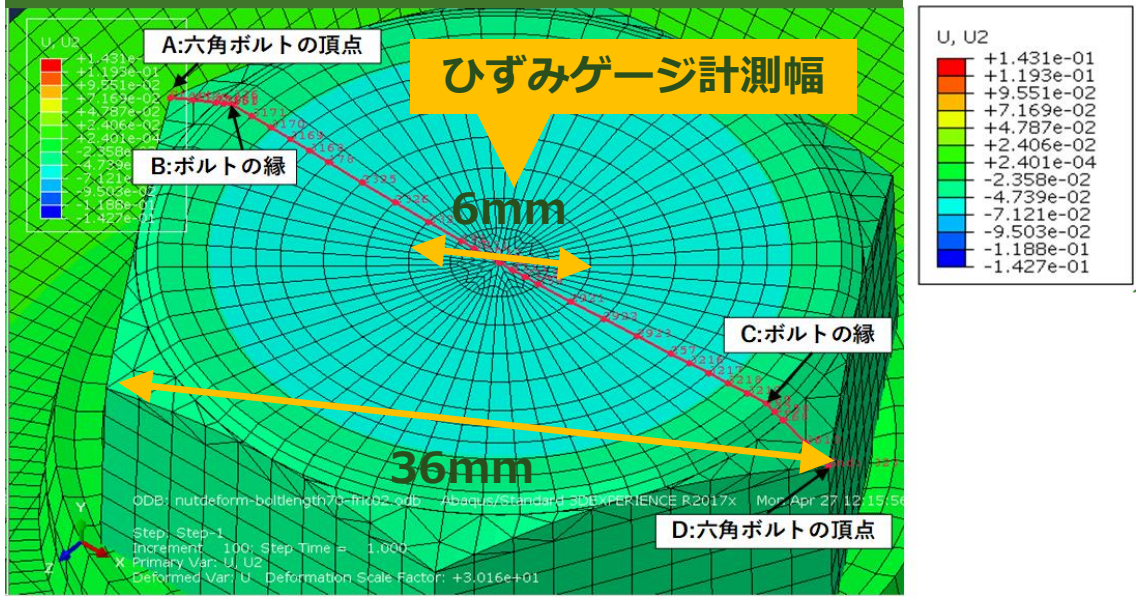
●撮影機材の設定：
・画像の種類　静止画像
・画像サイズ 1920×180
・感度 ISO 100
・露出時間　1/30sec
・絞り　F5.6
・撮影枚数　前後１０枚
・ストロボ発光　なし

●測定対象：高力六角ボルト日鐵住金ボルテン製　M22（F10T）
●測定用写真撮影機材：
・カメラ　キャノンＥＯＳ Kiss X5
・レンズ　タムロン 70-300mm(300mm)

●測定方法（撮影方法）：
・撮影距離　1.5m
・傾斜角度　0°
・解析方法　最小二乗マッチング法

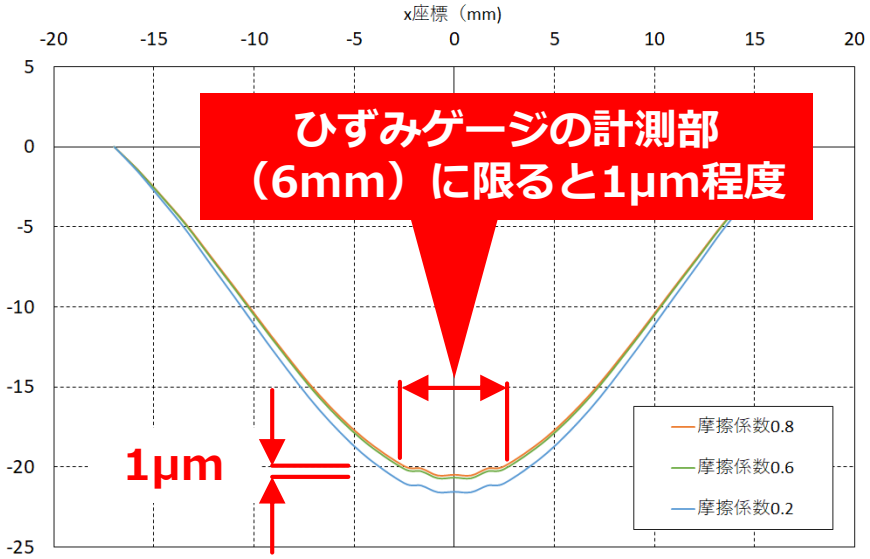
■軸力に対する水平方向変位と鉛直方向変位の関係

ボルト頭部のFEM解析結果



ひずみ(1550μm@6mm)から換算される変位量は9μm

軸力250kN時のボルト中央部変位分布



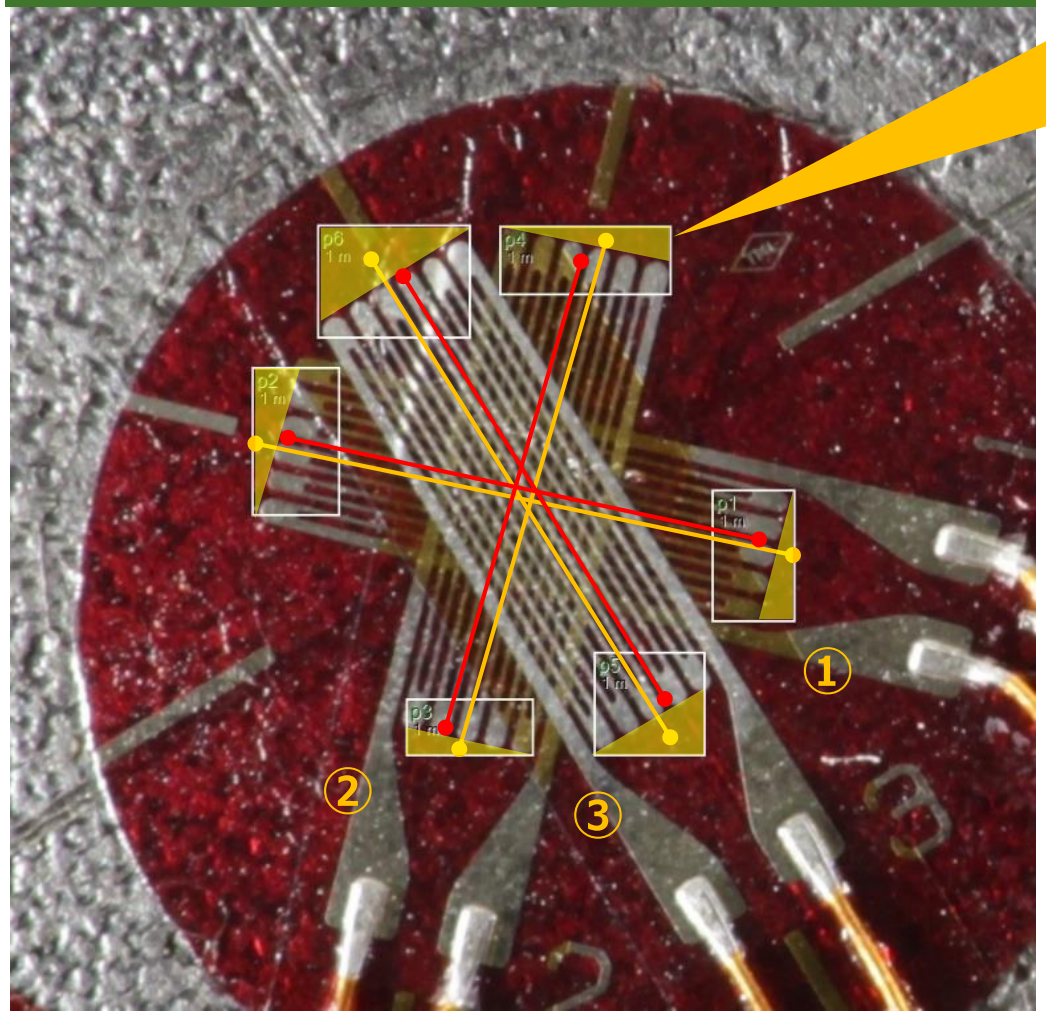
約1mの距離から望遠レンズで撮影した場合の、鉛直方向変位による画像への影響

↓

縮尺変化率:0.001/1000=0.000001で、水平方向に現れる影響は
6mm→0.000006mm(=0.006μm)であることから、画像上に現れる影響は全くない。

■ひずみゲージと画像処理の差の原因調査

画像計測における長さ：Lの定義

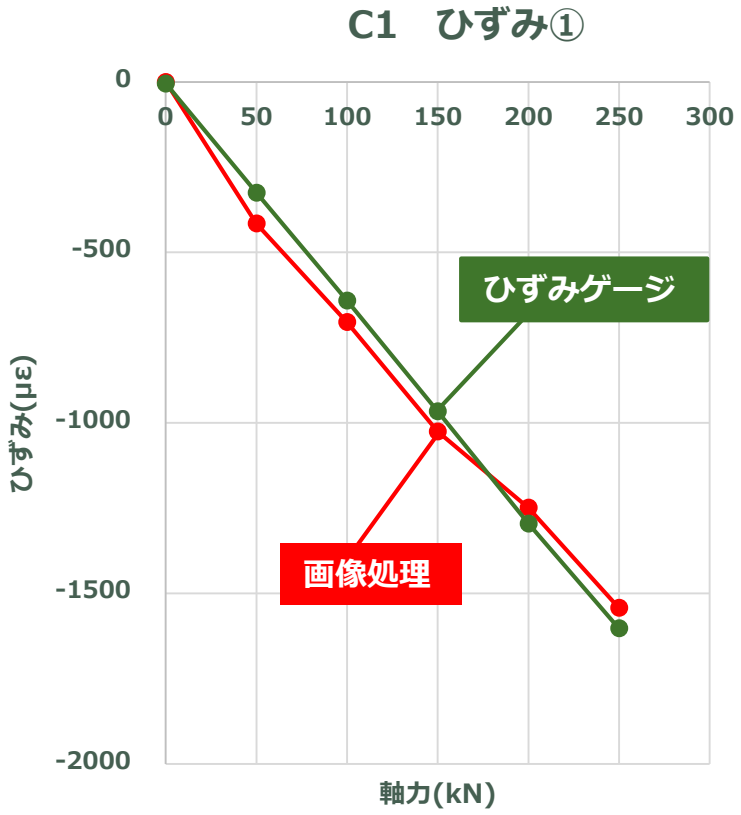


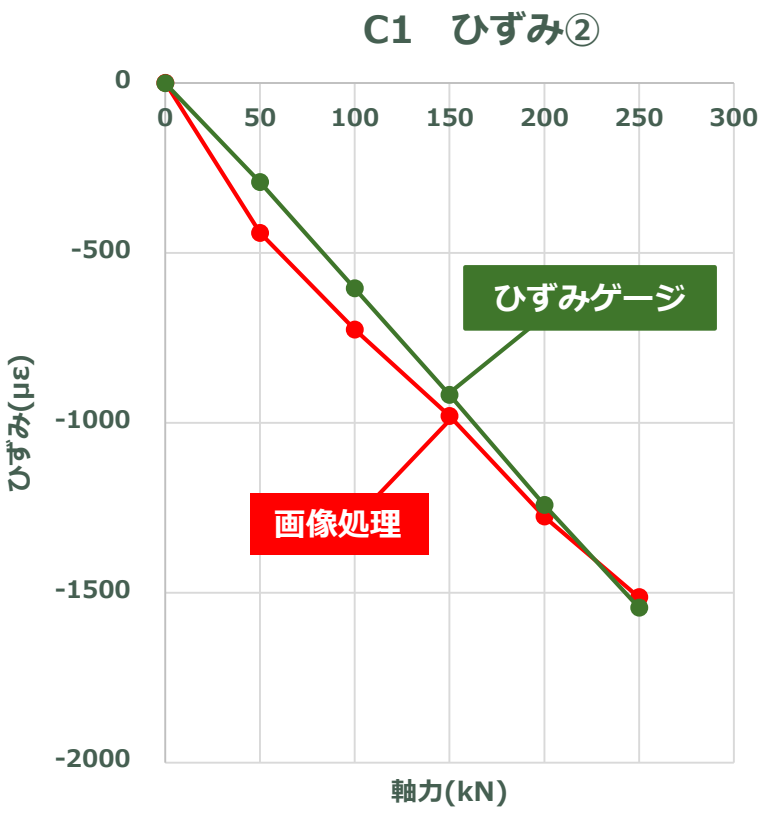
以前は領域中央間（ひずみゲージ）の距離をもとに計算していたが、ひずみゲージの端部以外は模様が直線的であり、変位計算に寄与しないため、実質的に有効な範囲は黄色三角で示した領域に相当する。そのため、実質有効な領域間距離Lの値を再計算した。
（黄色⇔の距離）

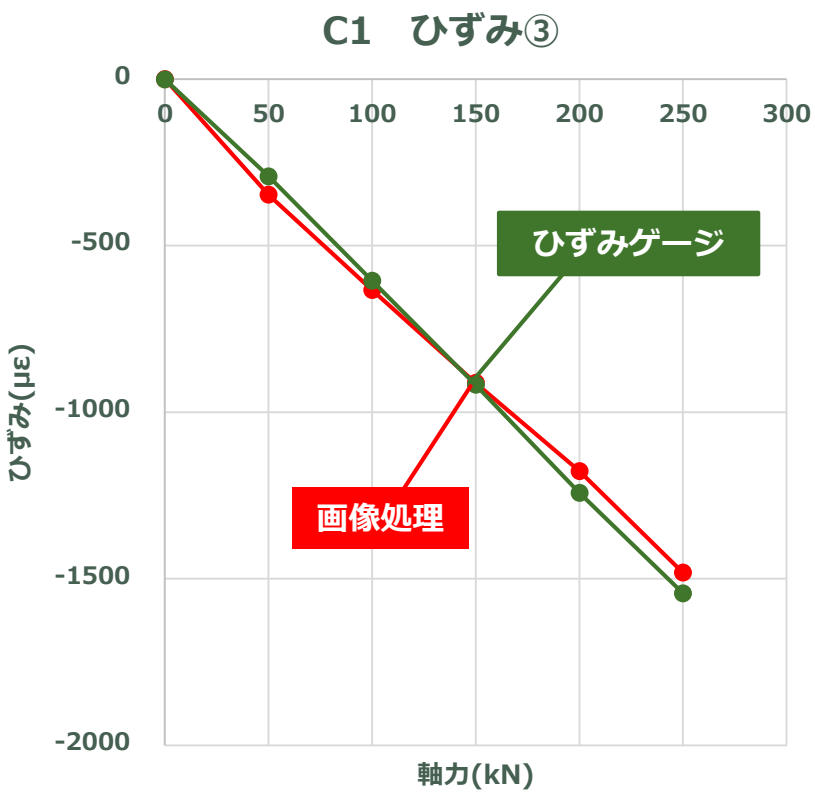
画像計測では複数の領域を定め、領域間の変位差をもとにひずみの計算をするが、その領域には幅があり、領域中央間の長さを“L”として定めている。

画像計測における距離の値を領域中心ではなく領域最大差とすると誤差が補正されることが分かった。また、少しひずみゲージの外側に領域を取り直すことで誤差が補正されると推測される。

■補正後のひずみゲージと画像測定の差





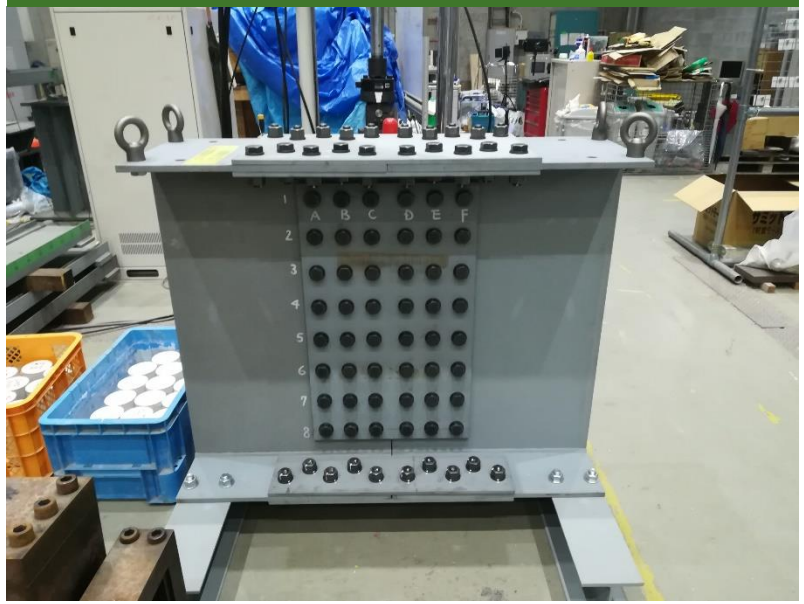


【結果】　・領域設定のプログラムを補正した結果、ひずみゲージと画像測定の差はほぼ無くなった。

■現場実測を想定した画像計測実験状況

現場実測に向けて、現場を想定しモックアップによる画像計測実験を実施

モックアップ（大学実験棟）



六角高力ボルト締付け状況

ボルト頭部画像測定状況

■現場実測を想定した画像測定実験による課題抽出

【課題抽出と対策】

- 実際の架設現場では、揺れる足場上で三脚を使った約1mの距離からの撮影となるが、撮影が困難となることが考えられたため、近接マクロ撮影専用の機材とソフト開発を行った[図1]
- 高力ボルト締付けを、手締め、予備締め、本締めと行ったところ、最初と最後でボルト頭部の位置が回転するため、回転に対する補正プログラムソフトの開発を行った[図2]

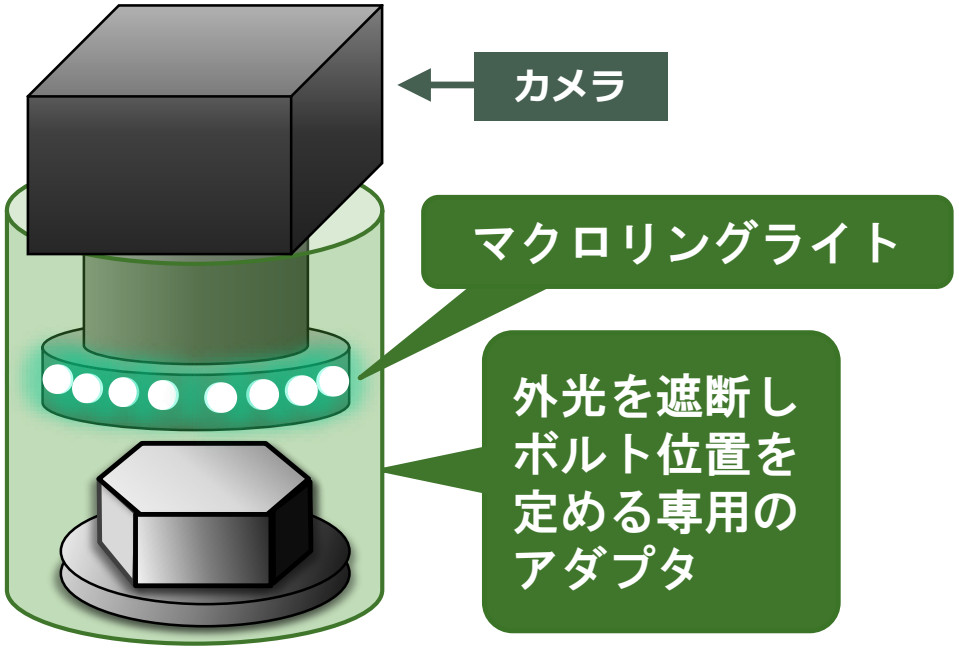


図1：近接撮影用専用アダプタ

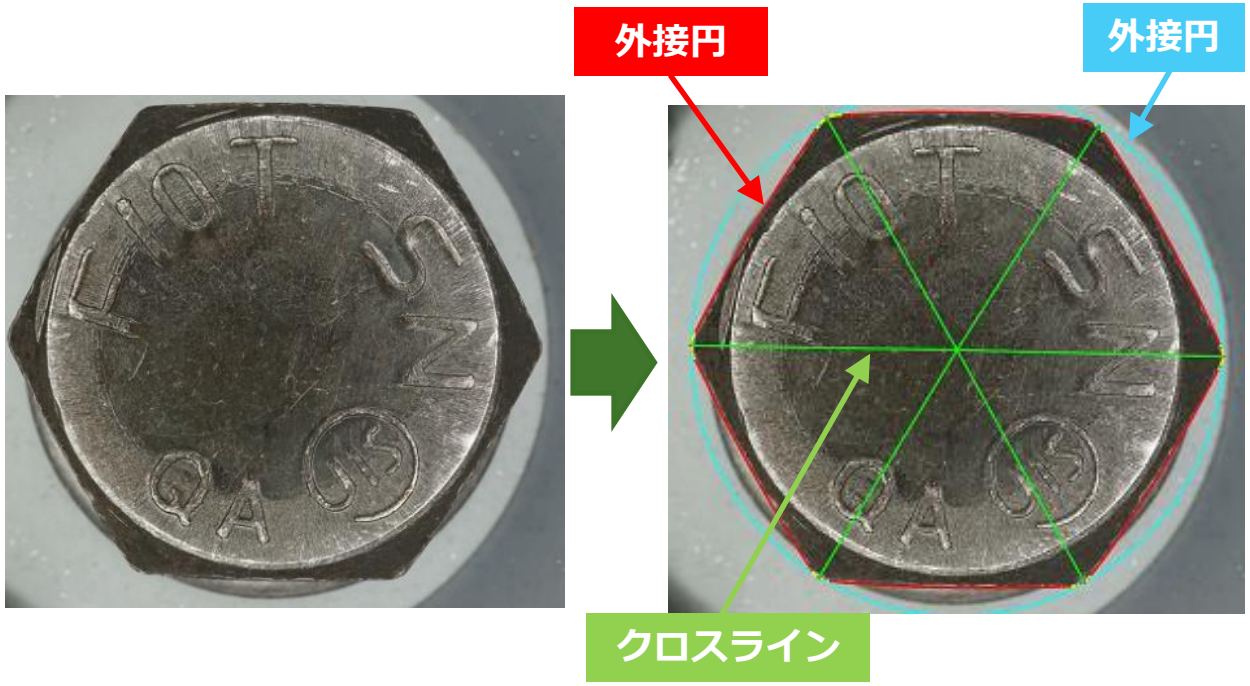


図2：ボルト頭部回転補正プログラム

■ 2年目の研究成果のまとめ

①実橋ボルトサンプリング業務

- 残存軸力の調査結果より、箱桁橋は鈑桁橋に比べ軸力低下率が高いこと明らかになった。
- D橋、G橋ともに箱桁下フランジの耳の部分の出が100mm 以内の橋梁については軸力低下率が極端に高いことが分かった。
- 同じ箱桁同士で残存軸力のバラツキが、六角高力ボルトでは変動係数が38%トルシア形高力ボルトで21%であった。これについては、ボルトの種類が影響していると考えられる。

②高力ボルト摩擦継手の限界状態評価法の検討業務

- 高力ボルト摩擦接合継手部に目違いが生じた場合、導入軸力は被接合部材の拘束条件が厳しいほど低下し、10%以上低下するケースも確認できた。このことから、箱桁はＩ桁よりも 拘束条件が厳しく、より軸力の低下しやすい状態にあると考えられる。
- 実物大箱桁下フランジに着目してFEM解析モデルを作成し、解析ステップは全ボルトに対し、予備締めおよび本締めを再現したものであり、モデルチェックを通過した。

■ 2年目の研究成果のまとめ

③画像処理ソフト開発業務（ボルト軸力計測用カメラ・画像計測ソフト）

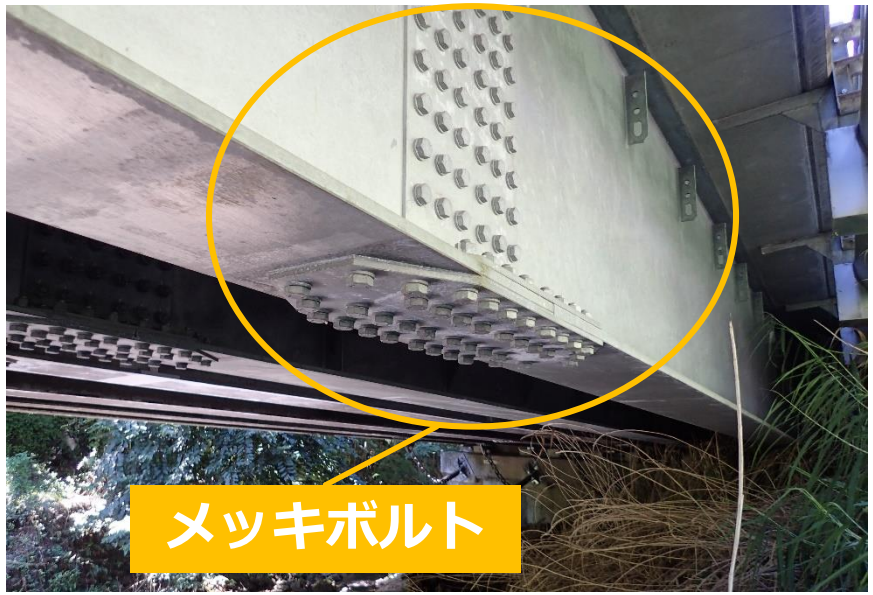
- 現場実測を行うにあたり、モックアップを使用した撮影実験を行ったことで、実験室と現場での課題と対策を確認した。
- モックアップ実験において、従来撮影手法（被写体までの距離1m程度）は有効ではないこと確認し、新たに考案した近接マクロ撮影手法が適用可能であることを確認した。
- ボルト軸力計測に特化した近接マクロ撮影用の専用撮影機材と専用のソフトウェアを開発した。
- 高力ボルト締め付け前と後のボルトの回転に対する補正プログラムソフトを開発した。
- 画像変位計測を利用することで、ボルト設置時の軸力推定を行うだけでなく、締め忘れや締め過ぎといった問題を発見できることがわかった。

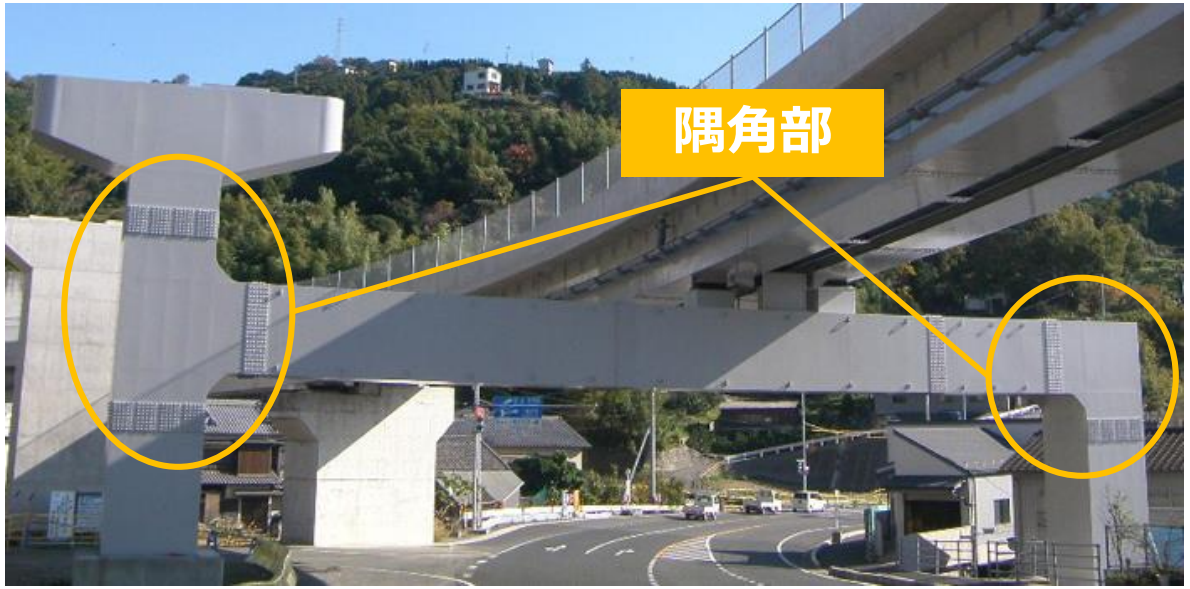
5. 本年度（最終年度）の研究目標

①実橋ボルトサンプリング業務

- 本年度は、メッキボルトおよび厚板の鋼製橋脚連結部より、高力ボルトのサンプリングできる橋梁を　提供していただき、引き続きサンプル数の確保を行う。
- 同じ箱桁同士で変動係数が異なる理由がボルトとの違いによるものか、同条件のトルシア形高力ボルトと高力六角ボルトを使用し、複数ロットのキャリブレーションを実施する。

➡ 高力ボルト軸力低下マップ（案）を提示する。





7. 本年度（最終年度）の研究目標

②高力ボルト摩擦継手の限界状態評価法の検討業務

・箱桁の高力ボルト継手では周辺の拘束が多く、目違いがある場合に鈑桁に対してボルト軸力が低下しやすい状態にあることが予測されるため、これらを踏まえ、施工手順をパラメータとした目違のある高力ボルト継手を有する鈑桁および箱桁のFEM解析を行い，軸力の低下性状を解明する。

➡ **モニタリング高力ボルトを用いた簡易すべり耐力評価法（案）を提示する。**

③画像処理ソフト開発業務（ボルト軸力計測用カメラ・画像計測ソフト）

・昨年度に引続き、高力ボルト軸力の画像マッチング法によるボルトのひずみ評価方法開発を進める。

・現在のソフトウェアはまだ試作段階であり、実利用を考えると使い勝手がよくないため、機能も性能も不十分である。現場において即座に軸力推定ができるようになるには、まだまだ多くの改良が必要であるため、多くの現場実証実験を重ね、問題点を抽出し、実際の現場で使える高力ボルト管理手法の省力化を検討する。

➡ **カメラ画像による高力ボルト導入軸力管理法（案）を手法とともに提示する。**

ご清聴ありがとうございました。