

X線応力測定法による橋梁の 鋼製フィンガージョイントに発生する応力の評価

郡 亜美^{*1} 河野 豊^{*2} 西土 隆幸^{*3}
Kohri Ami Kawano Yutaka Nishido Takayuki

インフラ構造物の保守は重要であり、点検の際の検査計測は、修繕の手間とコストの面から、非破壊で行うことが望まれる。本稿では、橋梁のフィンガージョイントに着目し、この部位に発生している応力の評価を、非破壊で応力測定ができるX線応力測定法を用いて試みた。その結果、この部位の応力評価にX線応力測定法が有効であることを確認した。

キーワード：X線回折、応力測定、FEM解析、鋼製橋梁、フィンガージョイント

1. はじめに

近年、インフラ構造物の老朽化は深刻であるが、メンテナンスが追いついていない状況である。構造物の保守は重要であり、点検の際の検査計測は、修繕の手間とコストの面から、非破壊で行うことが望まれる。

橋梁の各部位の名称を図1に示す。伸縮装置は、橋梁の路面端部に設置されるもので、気温変化の

影響による伸縮を吸収するためや、地震時および車両の通行にともなう橋梁の変形を吸収し、自動車や人が安全に通行できるようにするものである。伸縮装置の形状の一つとして、フィンガージョイントがある。健全な状態のフィンガージョイントを図2に示す⁽¹⁾。通常このフィンガージョイント間には、温度上昇による橋の伸びを吸収するた

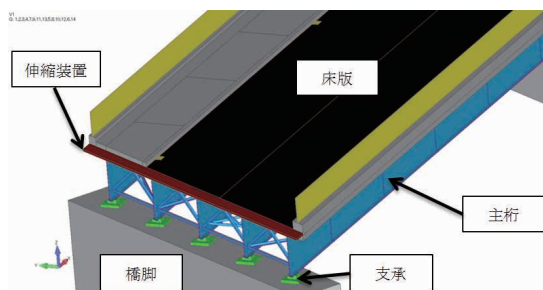


図1 橋梁の各部位の名称



図2 遊間のある健全なフィンガージョイント⁽¹⁾

*1：研究開発センター 研究開発グループ

*2：研究開発センター 研究開発グループ 次長 コンクリート診断士

*3：研究開発センター センター長 工学博士 技術士（建設部門） P. E. (Civil Eng.)
 名古屋大学大学院非常勤講師 芝浦工業大学大学院非常勤講師

めに、遊間が設けられている。しかし、地震などの影響により橋台が変形し、この遊間がつまってしまう事象が起きている。図3にその一例を示す⁽²⁾。この時、熱膨張により橋が伸びても遊間がないため、伸びを吸収することができず、この部位に過大な応力がかかってしまうことが考えられる。また、この発生応力によりフィンガージョイントと接触している部分の床版の損傷やフィンガージョイント付近の床版表面にひび割れが発生している事象も報告されている⁽³⁾。

フィンガージョイントが損傷に至ると、自動車事故につながる恐れがあり、この部位の保全は重要である。しかし、これまでフィンガージョイントの余寿命評価などに関する研究事例は少ない⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

本稿では、フィンガージョイントの余寿命評価を行う際の一つの指標になりうる、この部位に発生している応力の評価を、模擬試験体を作製しX線応力測定装置を用いて行った。

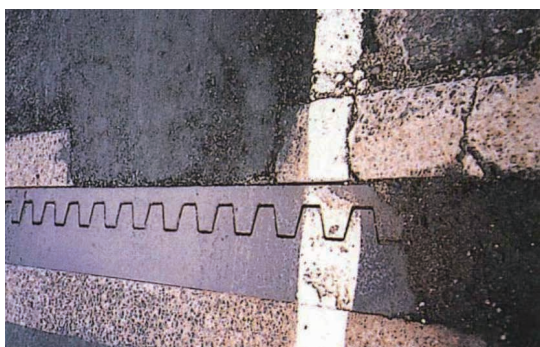


図3 遊間のないフィンガージョイント⁽²⁾

2. X線応力測定法⁽⁶⁾

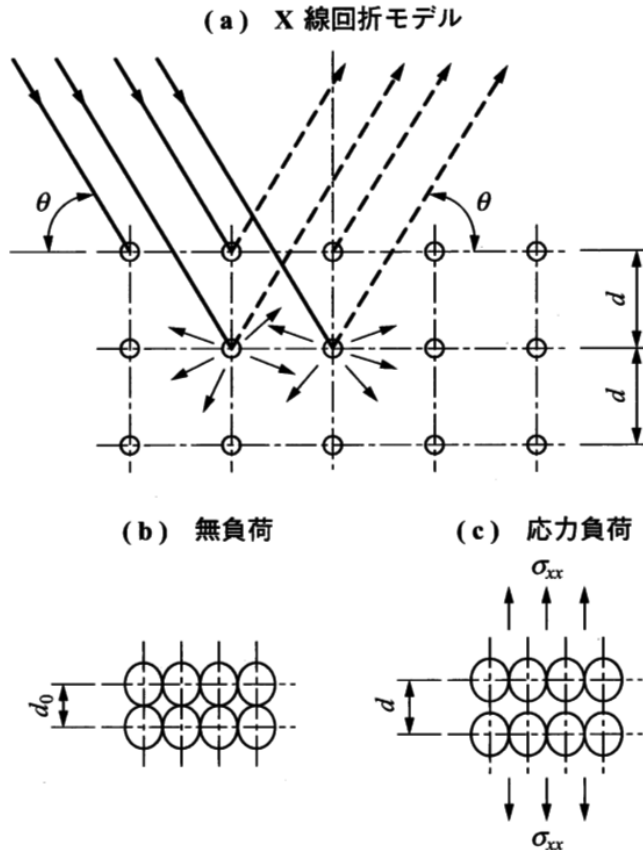
X線応力測定は、図4に示すブラッグ（Bragg）の回折条件を利用している。図5に試験片に引張応力 σ が作用した場合の格子面間隔の変化を示す⁽⁷⁾。格子面間隔 d は格子面法線が引張応力方向に近くなれば大きくなり、直交方向に近くなるに従って小さくなる。図6に1個の結晶粒が入射

X線で回折する状態を示しているが、回折X線の角度 η はブラッグの回折条件で決まる⁽⁷⁾。この時、 d の変化は図の ψ 角に依存するので、種々の ψ 角度に対応して d が変化する。 ψ 角度と d の変化の関係を求めて応力を評価する方法が $\sin^2\psi$ 法である。この手法は、従来より多くの測定機関で採用されており、公益社団法人日本材料学会「X線応力測定法標準（2002年版）」、JIS B2711等に解説され、標準方法となっている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

X線応力測定法は材料を問わず常時測定可能なものではなく、有効な測定値を得るためには種々の制約を受け、実際に測定した結果で判断する場合が多い。 $\sin^2\psi$ 法で有効な測定結果が得られるためには、試験体が以下の条件を満たすことが要求される。

- ①結晶体である（結晶粒が小さく、X線照射面積内で多数の結晶が計れて、この平均値が結果として得られる。粗大結晶や強い集合組織がない）。
- ②材料に強い優先方位を持っていない（材料が均一である）。X線は極浅いところ（表面から数十 μm 程度）を測定するので、急激な応力変化がなく、平面応力状態である。
- ③表面は塗膜、腐食生成物がない（金属表面である）。
- ④試験体測定部のX線照射領域が平坦である。
- ⑤材料の物性値（弾性定数、ポアソン比）が既知である。
- ⑥使用するX線波長 λ で高角度に回折する結晶面が存在する（およそ回折角度 $2\theta \leq 130^\circ$ ）。
- ⑦材料の無応力時の回折角度が既知であり、他の回折面による回折X線と接近していないこと（明確に区別できること）。

これらの条件が満たされれば、目的とする信頼性の高い応力測定結果が得られる。X線応力測定は、直接結晶格子間の距離変化を測定するので、



$$\lambda = 2d \cdot \sin\theta \quad \lambda : \text{特性 X 線の波長}$$

$$d : \text{格子面間隔} \quad \theta : \text{Bragg の回折角度}$$

$$\varepsilon_{xx} = (d - d_0) / d_0 \quad \sigma_{xx} = E \cdot \varepsilon_{xx}$$

図4 ブラッグの条件によるX線応力測定法の原理⁽⁶⁾

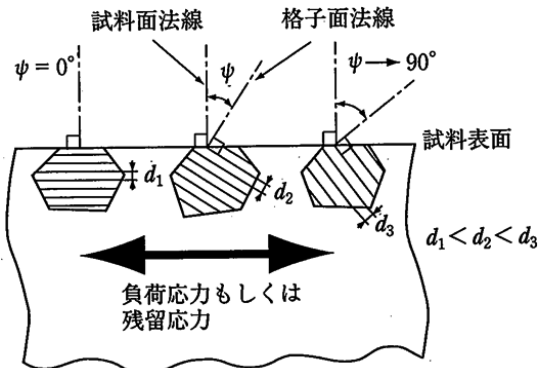


図5 引張応力 σ が作用したときの結晶格子面間隔の変化⁽⁷⁾

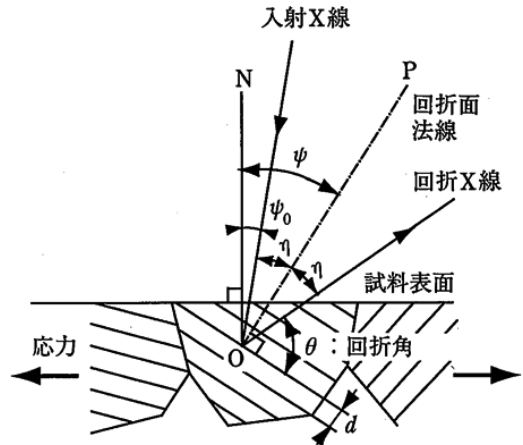


図6 1つの結晶粒内でのX線回折状況⁽⁷⁾

材料の製造過程、機械加工、表面仕上げ状況、保存状況、使用環境下の外力負荷状況など全てが加算された、測定時点・測定箇所に限定了なものとなる。

3. 試験内容

今回は、発生応力状態がより複雑になると考えられる斜橋のフィンガージョイントを対象に、FEM 解析と模擬試験体による載荷試験を実施し、その際に発生している応力を測定した。

3.1 FEM 解析による測定位置の決定

フィンガージョイントの応力状態を評価するために、事前に模擬試験体の線形 FEM 解析を実施した。フィンガージョイントの解析モデルを図 7 に示す。解析条件は以下のとおりである。

- ①有限要素には、4 節点平面応力要素 ($t = 30\text{mm}$) を使用した。メッシュサイズは、3 ~ 6mm 程度である。
- ②全要素数は 1,718、全節点数は 1,872 である。
- ③モデルの下端となる辺を完全拘束し、上端の辺には 500 (kN) の圧縮荷重を載荷した。
- ④上下のフィンガージョイント間は、面接触と定義した。

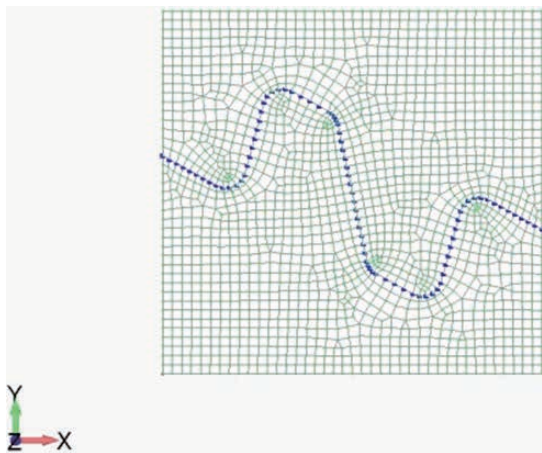


図 7 フィンガージョイント解析モデル

- ⑤摩擦係数 (μ) は、0 とした。

この解析結果を図 8 に示す。応力 (σ_y) の分布状態から、フィンガージョイント先端部で高い応力が発生することがわかった。この解析結果を受け、X 線で応力測定する部位を図 8 中の①~⑤の位置と決定した。

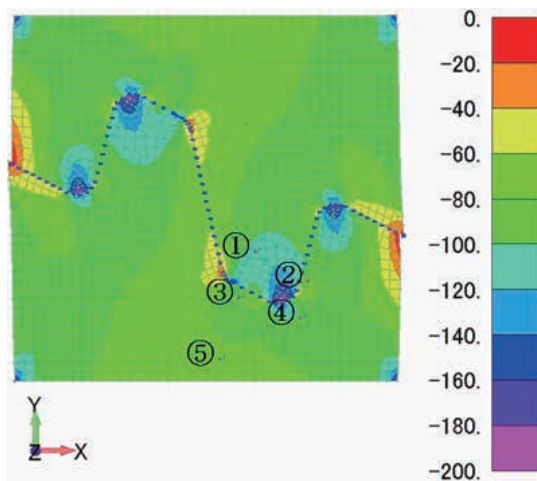


図 8 フィンガージョイント解析結果

3.2 模擬試験体

図 9 に模擬試験体の概略図を示す。材質は SM490A であり、2 対のフィンガージョイントを穴あき平板 (210 × 210 × 50mm) に溶接し、それぞれの試験体を組み合わせて、圧縮応力をかけられるようにした。

3.3 応力測定

応力測定装置には、当社が代理店販売を行っている Stresstech 社製の Xstress3000-SP を用いた。装置外観写真を図 10 に、測定条件を表 1 に示す。X 線応力測定値の妥当性を検証するためにひずみゲージによる応力測定も行った。X 線応力測定位置は図 11 に示すように、ひずみゲージの近傍とした。測定箇所は、加工による残留応力の影響を除去するために約 200 μm の深さまで電解研磨を施した。

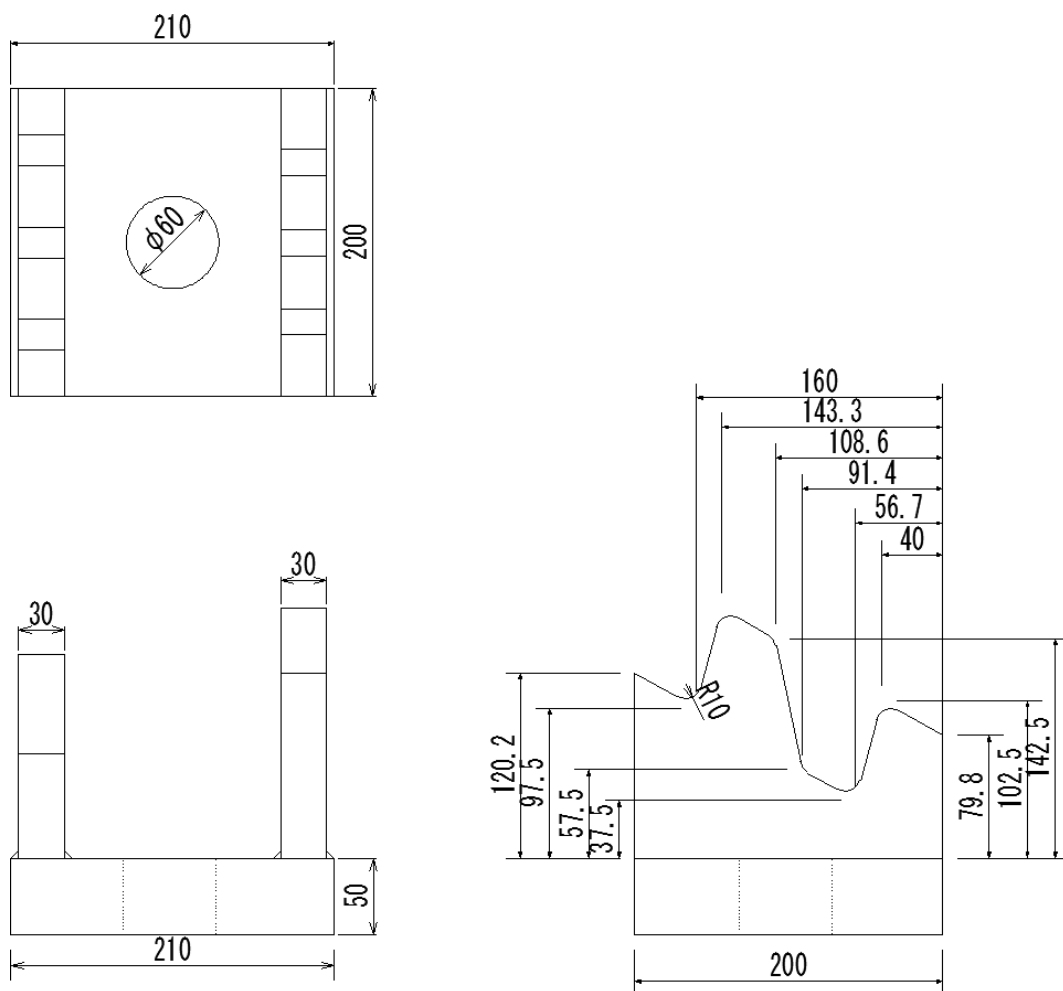


図9 フィンガージョイント模擬試験体の概略図



図10 Stresstech 社製：Xstress3000-SP

表1 X線応力測定条件

X線	Cr-K α
回折面	211
回折角	156.4
管電圧[kV]	30
管電流[mA]	6.7
照射径	ϕ 2.0mm

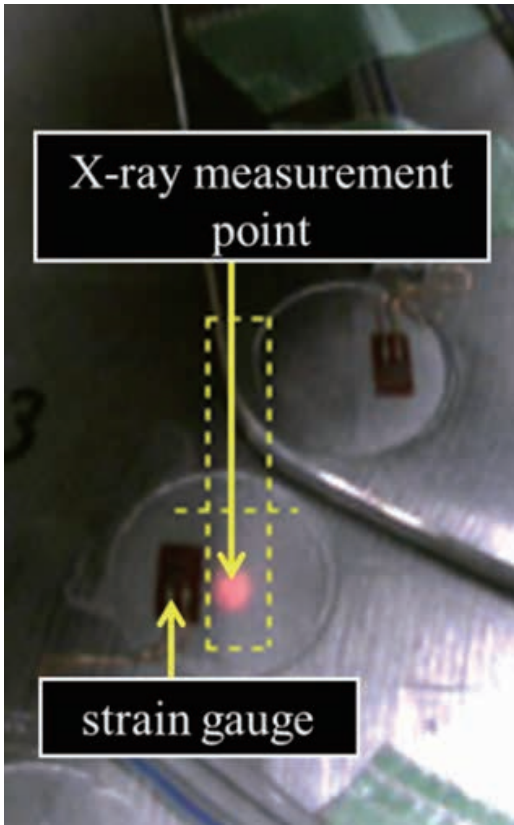


図 11 応力測定箇所

3.4 荷重方法

試験体の中心穴に荷重鋼棒を通し、センターホールジャッキ、油圧ポンプで荷重した。荷重荷重はセンターホール型のロードセルで測定した。荷重方法と測定状況を図 12 に示す。

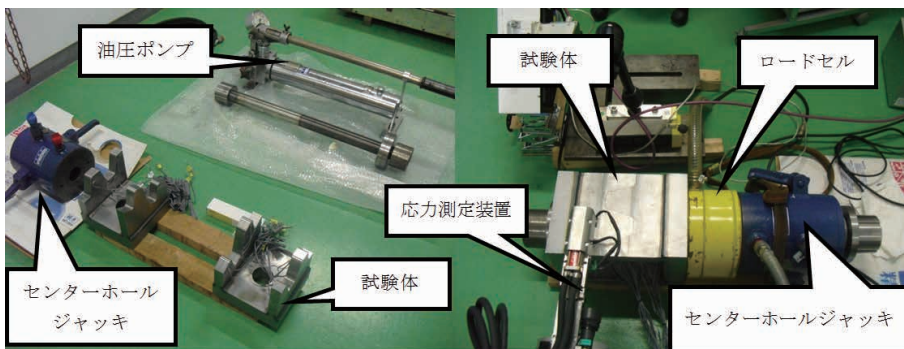


図 12 荷重方法と測定の風景

4. 測定結果および考察

測定結果を図 13 に示す。測定値と FEM 解析結果において、先端部 (④) の応力値は同等であったが、その他の場所においては、解析結果に比べて小さくなった。これは、解析条件の試験体接触状態を実験では再現できておらず、面同士が完全に接触している状態ではなかったことが原因と考える。しかしながら、測定値と解析結果の応力分布傾向は同じであった。また、ひずみゲージと X 線応力値は同等であり、X 線応力測定法の妥当性は確認できた。

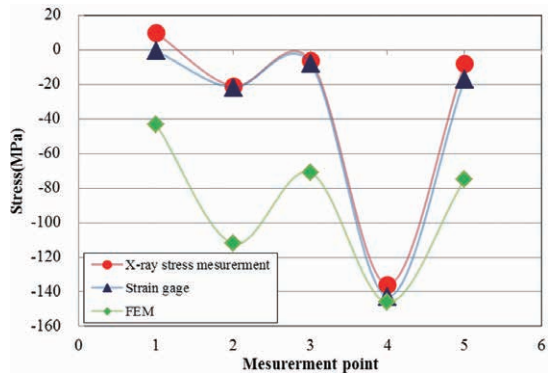


図 13 応力測定結果

5. まとめ

温度変化によってフィンガージョイントに発生する応力の評価をするために、実機を模擬した試験体を作製し、非破壊で応力が測定できる X 線応力測定法を用いてフィンガージョイントの応力測定を行った。解析結果との比較では、接触状態の違いから応力値に差がでたが、応力の分布傾向は同じであった。また、ひずみゲージと同等の測定値が得られ、X 線応力測定法の妥当性が確認できた。これにより、橋梁のフィンガージョイントの残留応力を含めた発生応力の測定には、X 線応力測定が有効であることがわかった。今回の X 線応力測定では、Xstress3000 を使用したが、当社ではフランジと垂直補剛材などの隅角部の応力が測定できる装置 μ -X360n も所有している。これまで、タンクや配管などの現地応力測定を行ってきたが、今後は、橋梁などのインフラ構造物の応力測定にも X 線応力測定法を活用していきたいと考えている。

参考文献

- (1) <http://www.chudai.co.jp/road/road05.html>
- (2) http://www.thr.mlit.go.jp/road/pato_bridge/pdf/101222_pato_bridge.pdf
- (3) http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_5.pdf
- (4) <http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00035/2008/63-01/63-01-0073.pdf>
- (5) <http://jcma.heteml.jp/bunken-search/wp-content/uploads/ronbun/2010/046.pdf>
- (6) 中代雅士、高久泰弘、郡亜美：X 線応力計測による現地計測の実際と活用法、検査技術、第 20 巻第 6 号、2015/6、pp.52-57
- (7) 田中啓介、鈴木賢治、秋庭義明：残留応力の X 線評価－基礎と応用－、養賢堂、第 1 版、2006、pp.99-105
- (8) 公益社団法人日本材料学会：JSMS-SD-5-02 X 線応力測定法標準－鉄鋼編－、2002
- (9) JIS B 2711：付属書 3（規程）残留応力の測定法、一般財団法人日本規格協会、2013



研究開発センター
研究開発グループ
郡 亜美

TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547



研究開発センター
研究開発グループ 次長
コンクリート診断士
河野 豊

TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547



研究開発センター センター長
工学博士 技術士（建設部門）
P. E. (Civil Eng.)
名古屋大学大学院非常勤講師
芝浦工業大学大学院非常勤講師
西土 隆幸

TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547