

## 鋼管集成橋脚における残留応力を評価する有限要素解析モデルの構築

京都大学大学院 学生会員 ○薛 迪緯  
 京都大学大学院 正会員 五井 良直  
 京都大学大学院 正会員 杉浦 邦征

京都大学大学院 学生会員 佐藤 顕彦  
 京都大学大学院 正会員 北根 安雄  
 阪神高速道路(株) 正会員 高田 佳彦

## 1. 序論

これまで図-1に示すような鋼管集成橋脚に関連する研究では、性能設計体系に基づき耐震性能に関する検討が主に行われたが、構造疲労耐久性に関する検討は少ない。したがって、本研究では、鋼管集成橋脚における残留応力を考慮した上で橋脚の疲労安全性の検証を行う。一般的に、残留応力は疲労耐久性に影響を及ぼす。例えば、溶接鋼管の製作過程においては、曲げ加工の際の鋼板表面の引張残留応力の発生が懸念される。特に、溶接部に生じる変動応力は、降伏応力程度の平均引張応力に加えて、繰り返し作用するため、疲労寿命に対して高平均引張応力の影響を明らかにする必要がある。本研究で対象とする鋼管集成橋脚に用いられているスパイラル鋼管の製作過程は従来型円筒鋼管の曲げ製作過程と異なり、残留応力の分布特性はより複雑であると想定され、残留応力や交通荷重の組み合わせによる変動応力下での疲労寿命の検証が不可欠である。以上の背景に基づき、製作過程を考慮したスパイラル鋼管の残留応力の分布特性を明らかにすることを目的とした。本研究では有限要素解析により、スパイラル鋼管の曲げ加工や溶接製作過程を再現してスパイラル鋼管における残留応力の分布特性を検証した。

## 2. 有限要素解析モデルの構築

スパイラル鋼管の残留応力を調査するために、汎用FE解析コードAbaqusを用いて図-4に示す解析を実施した。図-2に示す製作過程を再現するため、曲げ解析(解析I)、溶接解析(解析II)及び温度-変位連成解析(解析III)で構成される解析ステップを採用した。解析Iでは、平板の鋼板モデルを構築し、適切な解析条件を与えることで、曲げ変形をスパイラル状に与え、鋼管を形成し、その溶接部や一般部を含めて全体の残留応力の分布特性を評価した。なお、スパイラル鋼管の主要な構造パラメータを図-3及び式(1)~式(2)に示す。

$$C = \pi \times D \quad (1)$$

$$b = \frac{B}{\cos \alpha} = \frac{\pi \times D \times \sin \alpha}{\cos \alpha} = \pi D \tan \alpha \quad (2)$$

ここに、 $H$ は鋼管の高さ、 $C$ は鋼管の円周長さ、 $\alpha$ はスパイラルの交差角度、 $D$ は鋼管外径、 $B$ は鋼板の幅、 $b$ はスパイラルピッチである。曲げ解析モデルは、初期状態の鋼板とローラーの2つの部分から構成される。解析のメッシュ要素について、鋼板を8節点低減積分ソリッド要素、ローラーを離散化剛体要素でモデル化した。解析に用いたSKK490鋼の材料特性については、既往の研究より得られた降伏応力(454MPa)、引張強度(597MPa)を参考にバイリニアモデルを設定した。载荷については、曲げ製作過程を再現し、鋼板やローラーに安定な運動および変形を与えるために、ローラーに回転変位、鋼板に水平変位を与えて図-5に示す解析を行った。



図-1 対象橋脚における着目部位

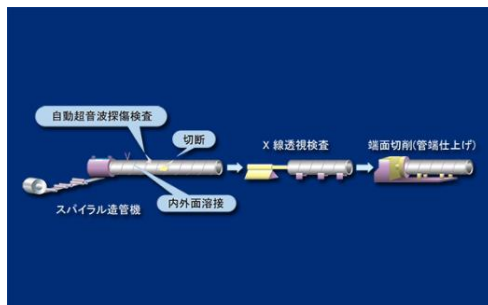
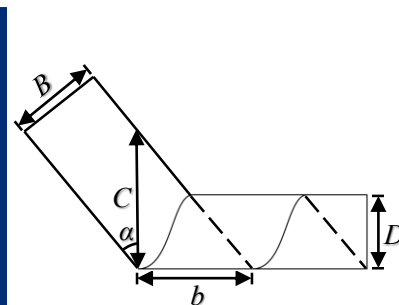
図-2 スパイラル鋼管の製作過程<sup>1)</sup>

図-3 鋼管の構造パラメータ

キーワード 鋼管集成橋脚, 残留応力, FEM 解析

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-3 棟 工学研究科社会基盤工学専攻 TEL 075-383-3164

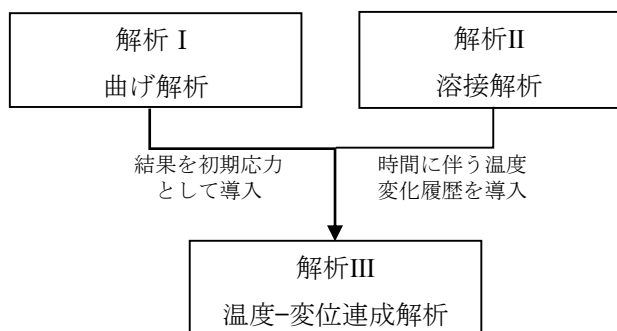


図-4 解析フロー

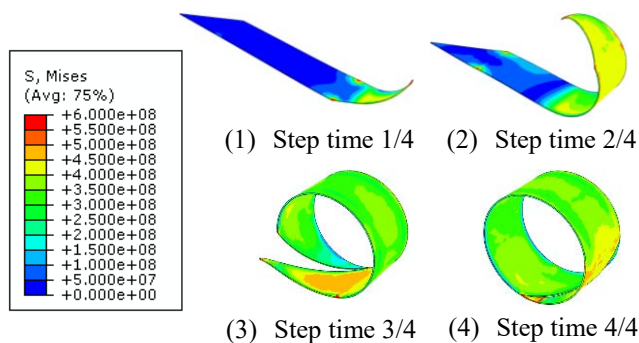


図-5 成形後鋼管の Mises 応力分布特性

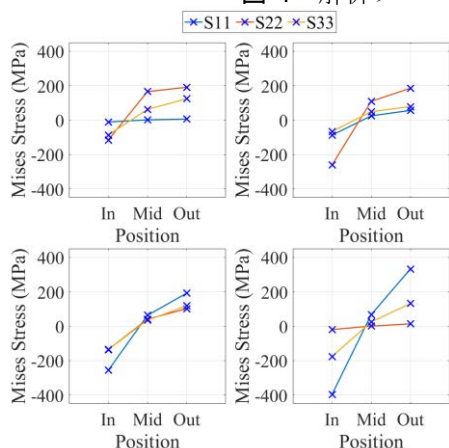


図-6 鋼管溶接部の応力分布特性

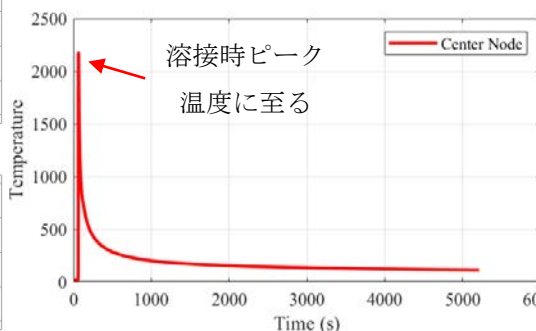


図-7 温度変化の履歴

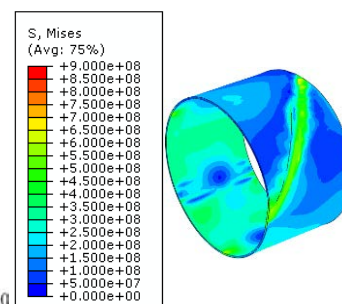


図-8 温度-変位連成解析の結果

解析 II では、スパイラル鋼管の円筒モデルを用いて、適切な境界条件と移動熱源を与えて、溶接開始から完全冷却までの温度分布を計算した。今回の溶接解析では、式(3)~式(4)に示すような二重楕円体熱源モデル (Double ellipsoidal power density)<sup>2)</sup>を用いた。溶接による温度荷重を模擬するために、Abaqus のユーザサブルーチン DFLUX 機能を用いて作用を加えた。なお、解析手法については、鋼管モデルで最初に配置した溶接線に沿って熱荷重を移動させる過渡解析を行う。

$$q_i(x_G, y_G, z_G) = \frac{6\sqrt{3}f_i Q}{abc_i\pi\sqrt{\pi}} e\left(-\frac{3x_G^2}{a^2}\right) e\left(-\frac{3y_G^2}{b^2}\right) e\left(-\frac{3z_G^2}{c^2}\right) \quad (i = f, r) \quad (3)$$

$$f_f + f_r = 2.0 \quad (4)$$

ここに、 $Q$  は溶接線に作用する熱量、 $q_f$  は熱源前半部分のエネルギー密度、 $q_r$  は熱源後半部分のエネルギー密度、 $f_f$ 、 $f_r$  は熱源前後半部分の熱量分布係数である。最後に、解析 III では、曲げ解析の結果の応力状態を、温度-変位連成解析の初期応力として導入し、そして図-7 に示す溶接解析より得られた時間に伴う温度変化の履歴を入力して、スパイラル鋼管全体の変形及び残留応力を明らかにした。

### 3. 解析結果

図-6 では、横軸の鋼管の内側(In)、中立面(Mid)、及び外側(Out)に対して、Mises 応力を示すが、鋼管の外側で引張、内側で圧縮の板曲げ応力が発生していることが分かる。図-8 に示す温度-変位連成解析の Mises 応力より、溶接線近傍の応力値は降伏点に至ることが確認された。例えば、溶接線周辺の円周方向の応力は 350Mpa 程度と算出された。さらに、先行研究から得られた変動応力と重ね合わせ、引張平均応力が卓越する (応力比は 0 以上) ことが分かっており、残留応力は疲労強度評価に用いる必要性が高いことが分かる。しかし、解析の残留応力結果は先行研究で行われた実験のデータより高いという結果であるため、今後再現度がより良い解析モデルを構築する必要がある。

**参考文献** : 1) JFE 大径鋼管株式会社. Available: <http://www.jfe-steelpipe.co.jp/business/process.html>. 2) J. GOLDAK, A. CHAKRAVARTI and M. BIBBY, A New Finite Element Model for Welding Heat Sources, METALLURGICAL TRANSACTIONS B, pp. Page 299-305, VOLUME 15B, JUNE 1984.