ショットピーニング処理により導入される残留応力の解析的検討

1. はじめに

ショットピーニング(以下 SP)は、鋼材表面に無数のショ ット材を衝突させることにより表面に圧縮残留応力を導入す る処理である.第2著者らの既往研究1)より、溶接部に SP を施すことで疲労強度向上効果が得られることが明らかにさ れている.

一方で SP の処理条件によって残留応力分布の形態は変化 し、部材の疲労強度向上効果が異なることから、SP の処理条 件と残留応力の分布形態との関係を見出すことは有意である. この検証に際し、SP により導入される残留応力分布の数値シ ミュレーションを行うことができれば、効率的と考えられる. しかし、ショット材が動的に衝突し、かつ鋼母材に塑性変形 が生じるといった動的な弾塑性問題であるため、特に、橋梁 分野では取り扱われた研究事例が少なく、効率的な解析手法 の構築には至っていない.

本研究では、動的陽解法有限要素法(FEM)を用いて SP に より導入される残留応力の解析手法を構築することを目的と した.まず、既往研究^{2,3}と同様のショット材が一つの単球衝 突の解析を行い、既往研究との比較を通じて、計算コストが 低く、かつ精度のよい解析モデルの構築を試みた.その上で、 ショット材が複数衝突する解析、並びに各パラメータ解析を 実施し、残留応力分布変化を検討した.

2. 単球衝突の解析モデルの概要と解析結果

図-1 に単球衝突の解析モデルを示す.解析モデルの寸法及 び材料特性は文献 2)のモデルと同じとし、寸法は、板厚 3.2 mm,長さ8mm,幅8mmの被加工材に対し、直径0.8mmのシ ョット材とした.要素寸法は衝突箇所を最小(0.04mm)とし、 衝突箇所から離れるにつれて段階的に大きくした.モデルの 節点数,要素数はそれぞれ176157,170280である.境界条件 は、被加工材の底面における節点のみz方向変位を固定した. 被加工材の材料特性はSUS316L、ショット材は質量2.118mg の剛体とSUS304の2種類とし、表-1に示す.ショット材の 初速度は30m/sおよび60m/sとした.また、本研究では、モ デル構築、並びに計算コストを抑えるために、ショット材を 剛体としたモデルを検討した.FEM解析には、衝突解析を得 意とする非線形汎用コードであるRADIOSSを用いた.

図-2にショット材衝突後の残留応力分布のコンター図を示 し、図-3に、図-2中における A-A'部での表面からの深さ方 向の残留応力分布結果と、北村の結果 ³を比較したものを示 す.図-3より、表面付近に引張応力が導入され、深さ方向に 大きくなるにつれて圧縮応力が導入されるという、SPによる 残留応力分布の特徴を示していることが確認できる.また、 ショット材を剛体で作成したものと SUS304 で作成したもの を比較すると、圧縮残留応力の最大値は同程度を示すが、 SUS304 で作成したモデルでは、残留応力がゼロとなる深さ (以下塑性域深さ)が小さく、解析時間が約2.5倍となった.本 解析結果と北村の結果と比較すると、最大値となる深さと塑 性域深さの値が概ね一致した.これより、RADIOSS 動的陽解 法にて、既往の研究と同等の精度が得られていること、並び に剛体で作成したモデルであっても残留応力分布を良く評価 可能といえる.

3. 複数衝突の解析モデルの概要と解析結果

前節より単球解析にて導入される残留応力分布が明らかと なった.次に、実際の SP では無数に投射されたショット材同 士の影響について検討するために、複数のショット材による 衝突解析を実施した.ここでは、ショット材同士の相対位置



図-1 単球衝突の解析モデル 図-2 単球衝突のコンター図 表-1 単球衝突の材料特性



図-3 単球衝突の残留応力分布

が残留応力分布に及ぼす影響について検討した.

解析モデルの寸法及び材料特性は文献 3)のモデルと同じと し、寸法は、板厚 5.1 mm,長さ 15 mm,幅 15 mm の被加工材に 対し、直径 2.36 mm のショット材とした.要素寸法は衝突箇 所を最小(0.125 mm)とし、衝突箇所から離れるにつれて段階 的に大きくした.モデルの節点数,要素数はそれぞれ 157985,152568 である.境界条件は、被加工材の底面における 節点のみ z 方向変位を固定した.被加工材,ショット材の材 料特性は表-2 に示す.初速度は 32 m/s とした.ショット材同 士の距離 D は、x 軸方向に向かって D=0,0.1R,0.2R,0.3R, 0.4R,0.5R,0.75R,R(ただしR はショット半径:1.18 mm)の 8 通りとし、D=0(x=0)においてはショット材 3 個目の衝突解 析も実施した.

x=0 の位置におけるショット材衝突後の残留応力分に関し て、第2ショット材が第1ショット材と同位置に衝突したと き、圧縮残留応力の最大値は小さくなり、塑性域深さは深く なる.また、第3ショット材が第1,第2ショット材と同位置 に衝突したとき、残留応力分布は第2ショット材の衝突時と ほとんど似た分布となり、残留応力が収束した.

次に, 第2ショット材が x 軸方向に D=0~R 離れた位置に 衝突したときの x=0, D の位置での残留応力分布をそれぞれ 図-4, 図-5 に示す. 図-4 より x=0 の位置において, 第2ショ ット材の衝突位置が D=0.1R のときに圧縮残留応力が最大と なり, 図-5 より x=D の位置においては, 第2ショット材の衝 突位置が x=0 から離れるにつれて圧縮残留応力の最大値が次 第に大きくなり, D=0.3R において最大となった後, 緩やかに



減少した. 圧縮残留応力の最大値が第2ショット材の衝突位 置によって変化するのは, 互いのショット材により導入され る残留応力が重ね合わされることによると思われる.

以上の結果に加えて、さらに 3~6 個のショット材による衝 突解析を実施した.ショット材の衝突位置は、ショット材 3 個では D=0, 0.1R, 0.2R, 4 個では D=0, 0.1R, 0.2R, 0.3R, 5 個では D=0, 0.1R, 0.2R, 0.3R, 0.4R, 6 個では D=0, 0.1R, 0.2R, 0.3R, 0.4R, 0.5R とした. 3~6 個のショット材衝突後 における x=0 の位置での残留応力分布に関して, x 軸方向に x=0.1R ずつずらして追加でショット材を衝突させると, x=0 の位置での残留応力分布は、ショット材の個数が増えるほど 被加工材の表面の引張残留応力は大きくなるが、圧縮残留応 力分布の概形はほとんど変化しなかった.

以上より2個目以降のショット材の衝突箇所によって圧縮 残留応力の導入量は大きくなることが明らかとなり、単球衝 突解析から得られる残留応力の結果を下回ることは殆どない 結果が得られた.また、第2ショット材の位置によっては導 入される残留応力が100 MPa 程度大きくなるなど、複数回 SP を実施することのメリットが伺えたが、実際のSPでは無数の ショット材がランダムで衝突し、衝突位置等の正確なコント ロールは困難であるため、単にSP 回数を増やしたとしても残 留応力が大きくなるとは言えず、複数回の効果が限定的にな る可能性がある.

4. パラメータ解析の概要と結果

各種 SP 処理条件が圧縮残留応力に及ぼす影響を把握する ために、ショット材の速度 V, 半径 R, 質量 M をパラメータ として衝突解析を実施した.本節の検討には、単球衝突の解 析モデルを用いることとし、モデル及び解析方法は 2 節と同 様として、効率的にパラメータ解析を行うためにショット材 は剛体とした. 表-3 にパラメータ解析一覧を示す.図-1 に示 す解析モデルを基本系とし、パラメータ倍率は任意に設定し た.

パラメータ解析結果を図-6に示す.図-6より,速度V,質量M,半径Rともに値を増加させることで塑性域深さが大きくなる傾向が得られた.例えば,残留応力の導入量を増加させたい場合は、ショット材の質量を増加させることが効果的のように伺える.このパラメータ解析結果から得られた傾向は、理論的に得られた傾向⁴とも良く一致した.これより、今



回作成した解析モデルは、パラメータの変化による残留応力 分布の変化を良く再現可能であり、今後、 SP の処理条件を 決定する上で、本解析モデルを用いた数値シミュレーション よる検討が可能といえる.

5. 結論

1)単球衝突の解析を基に、ショット材を剛体とした計算コス トを抑えつつ、かつ精度のよい解析モデルを構築することが できた.

2) 複数衝突の解析の結果,2 個目以降のショット材の衝突箇 所によっては圧縮残留応力の導入量は大きくなることが明ら かとなり、単球衝突解析から得られる残留応力の結果を下回 ることは殆どない.

3) パラメータ解析の結果,作成した解析モデルがパラメータ の変化に対応していることが確認でき,本解析モデルを用い た数値シミュレーションよる検討が可能といえる.

〈参考文献〉

1) Kinoshita K et al: Fatigue Strength Improvement of Welded Joints of Existing Steel Bridges by Shot-Peening, International Journal of Steel Structures, Vol.19, No.2, pp.495-503, 2019 2)北村徳識: B07 ショットピーニング時における応力緩和挙動についての力学的検討,大阪府立大学 平成 26 年度卒論概要, 2015.2 3)高橋 孝幸ら:ショットピーニングにおけるひずみ分布の有限要素 解析,塑性と加工(日本塑性加工学会誌)第50巻第557号2009.2 4)渡邊吉弘ら:ショットピーニングによる残留応力分布のシミュレーション,材料,

Vol.44, No.496, pp.110-115, 1995.1