

## 既設鋼橋溶接継手部を対象とした橋梁用ショットピーニングの 動的陽解法を用いた数値シミュレーション

木下 幸治

岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 准教授

### 1 研究の背景

ショットピーニング（以下SP）とは、鋼材表面に無数のショット材を衝突させることにより、表面付近を塑性変形させることで、圧縮残留応力を導入する技術である。最近この工法が、塗装塗り替え時に行うブラストと同様の設備を使用することで、鋼橋の塗装塗り替え工事にSP処理を実施することができるようになった。著者は、既設鋼橋の応力集中部である溶接継手部の疲労強度を確保するために、SPの適用性を検討し、SPにより溶接部止端部周辺に導入した圧縮残留応力により疲労強度を向上可能であることを明らかにしている。一方で、SP処理の条件によりショット材の衝突時の運動エネルギーが異なる。すなわち、残留応力分布形態の変化にともない疲労強度向上効果も変化するため、SP処理の条件と残留応力分布形態との関係性から最適なSP処理条件を見出すことは有意である。

本研究では、既設鋼橋の溶接継手部を対象に、塗装塗り替え時に実施可能な橋梁用SPの効率的な施工条件を数値シミュレーションに基づき検討した。

### 2 研究方法と主な研究成果

#### 2.1 数値シミュレーションモデル

本研究では、RADIOSSを用いた動的陽解法有限要素法によりSPによる残留応力の導入シミュレーション

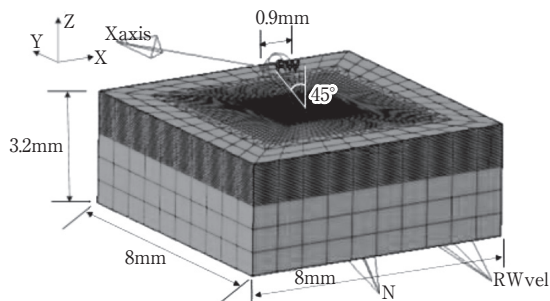


図1 数値シミュレーションモデル

解析を行った。図1にSPの解析モデルを示す。板厚3.2mm、長さ8mm、幅8mmの鋼母材を対象にした。解析モデルの大きさに関しては、母材の寸法をパラメータとした解析を事前に実施しており、本稿の解析モデルの大きさであれば、SPによって導入される残留応力が評価できることを確認している。鋼母材とショット材中心までの距離はz軸方向に1.2mm、x軸方向に-0.8mmとし、角度45度で鋼母材の中心に衝突するようにショット材の初期位置を決定した。このとき、重力加速度を定義していないため、鋼母材とショット材の距離が解析結果に与える影響はないと仮定した。鋼母材には6面体8節点ソリッド要素を用い、RADIOSSの推奨点であるGaussの8積分点を使用した。鋼母材の要素寸法はショット材衝突箇所ですべて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176,157と170,280である。モデルの境界条件は、鋼母材の底面における節点のみz方向変位を固定した。鋼母材の材料特性はSM490YAとした。鋼母材の材料特性はヤング率200GPa、降伏強度は434MPa、ポアソン比は0.3であり、2次勾配を弾性係数のE/100とするバイリニアモデルとした。なお、硬化則を考慮できるJohnson-Cookモデルを用いて等方硬化則で定義した。また、降伏基準にはミーゼスの降伏条件を用いた。ショット材は直径0.9mm、質量5.6mgの剛体とした。ショット材の速度は、後述する高速度カメラを用いた画像計測結果より得られた最小値、最大値、最頻値を考慮して決定した。接触条件として、接触が検知されるとスレーブ節点の加速度と速度が修正されるコマンドであるRWALLを用いた。これは、節点が壁を貫通することを避けるためのスレーブ節点セットに作用する点拘束である。なお、ひずみ速度依存性、減衰は考慮しておらず、時間増分の設定



図2 ショット材の撮影結果の一例

は、Courant条件に基づいて設定した。

## 2.2 ショット材の速度計測

ここでは、高速度カメラ(MEMRECAM Q1m)を用いて、ノズル形状および試験体とノズルとの投射距離を変えた場合のショット材の速度を計測した。シャッター速度は1/5000秒、フレームレートは3000fpsで撮影を行った。なお、撮影に十分な明るさを確保するためにLEDライトを2台用いた。図2にショット材の撮影結果の一例を示す。画像は不鮮明であったため、ショット材自体をとらえて画像計測を実施することは難しいが、ショット材の残像をとらえることは可能であったため、ショット材の残像よりショット材の速度を計測することとした。このため、フレームレートを上げることなく速度計測を実施した。また、画像計測においては、メモリカム制御ソフトウェアHXLinkを用いて画像計測を行った。画像内に写るノズルの直径が既知であったため、その値から画像の1pixelあたりの実際の長さを算出することで、画像から実スケールの変換を行った。ショット材投射速度は試験体溶接部から0~40mm程度の距離にある50個を対象とした。各画像間の時間間隔は0.00033秒であるため、画像間にショット材が移動した際にみられる残像の距離を測定し、それを画像間の時間間隔で除すことでショット材の投射速度を算出した。

図3にショット材投射速度の計測結果を示す。ストレートノズルで投射距離が離れた160mmのケースは他の結果よりも速くなったが、その他のケースでは、ノズルと投射距離によらず概ね60m/s程度になり、従来考えられていた値と良く一致した。

## 2.2 数値シミュレーション結果

図4に解析結果より得られた残留応力分布および速度に対する最大圧縮残留応力の結果を示す。図4の縦軸は表面からの距離、横軸はx軸方向の直応力成分の残留応

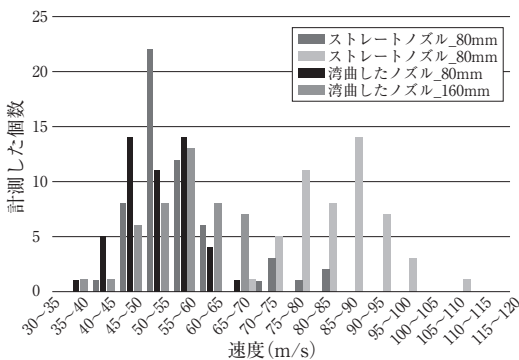


図3 ショット材投射速度計測結果

力を示し、負の値が圧縮残留応力を示している。図4より、速度の増加にともない、圧縮残留応力の最大値は小さくなるが、最大圧縮残留応力となる深さと塑性域深さが深くなることが確認できる。よって、今回の解析は各ショット一回であるが、同じ処理部に異なる速度のショットを複数回衝突させることで実験結果の再現性が高まるのではないかと推察される。また、図4のように、速度の増加にともない残留応力の最大値が小さくなり、速度100m/sを超えた付近から収束し始めることがわかった。また、速度を35m/sから130m/sまで大きく変化させたにも関わらず、最大圧縮残留応力の変化は±10%以内に収まることがわかった。さらに、図4中に表示する実際の橋梁における残留応力計測結果との比較より、最大圧縮残留応力となる深さおよび塑性域深さは、速度60m/sにおける解析結果において実際の計測結果である100μmおよび500μm程度となり、塑性域深さに関しては似た結果を得ることができた。最大圧縮残留応力となる深さに関してはさらに再現性を高める必要があると考えられる。

以上より、投射速度計測結果より、ショット材の速度は概ね60m/s程度になることを明らかにした上で、解析的に残留応力に及ぼす速度の影響を60m/sを基準とした場合には±10%以内に収まることが、実橋梁の残留応力計測結果との比較から塑性域深さが速度60m/sとした場合に良好な一致がみられたことから、SPの速度としては、塑性域深さを議論する際には60m/sを基準に考えるのが妥当と考えられる。一方で、最大圧縮残留応力およびそのときの深さに関しては解析結果との一致はみられなかった。

## 3 おわりに (今後の展望)

以上のように、SPの数値シミュレーションを行い、その実験結果の再現性を検討した。高速度カメラによる画像計測を基に算出したショットの速度を反映もさせた

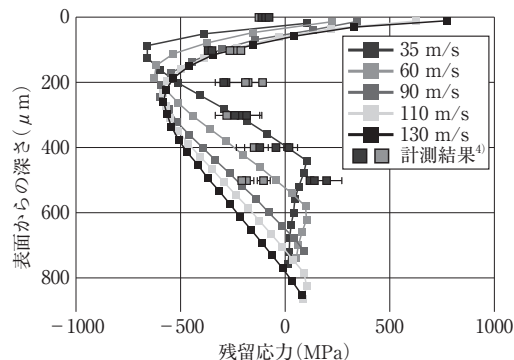


図4 数値シミュレーション結果

が、いまだに残留応力の絶対値の再現性には課題が残っている。引き続き、ショット材の弾塑性挙動、衝突面の材料特性等を調査した上で、数値シミュレーションの再現性向上を図りたい。