# 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

北村 徳識 (指導教員 柴原 生島)

Study on Stress relaxation Behavior during Shot Peening

#### by Yoshisato Kitamura

#### Abstract

Heavy thick plate welding of steel is used in plants such as petro chemical plants, boiler plants and atomic plants. However, after welding, the strong tensile residual stress occurs in or near the welding joints. Stress corrosion cracking may occur if the environment, material, and mechanical factors are superposed. Therefore, to prevent stress corrosion cracks, it is important to improve tensile residual stress. Then, the surface treatment such as Water Jet Peening (WJP) and shot peening (SP) are performed on the weld joints after welding.

In this study, to develop the prediction system of the stress relaxation behavior during SP, dynamical structural analysis procedure was formulated. To achieve efficient computation, Idealized Explicit FEM was employed. Then, stress behavior of the collision load of SP was discussed to investigate the load distribution. Then, the load distribution model of SP is introduced and the prediction system of the stress relaxation behavior of SP was constructed. Finally, the usefulness of this system was shown by applying to analyze the dynamical behavior during SP.

# 1. 緒 言

化学プラントや環境プラント、原子力プラントなどの 鋼構造物では厚板鋼板が使用され、その製造及び組み立 てにおいては溶接が広く用いられている.しかし,溶接 の施工に伴い溶接部近傍には残留応力が必然的に発生し, 応力腐食割れ(Stress Corrosion Cracking ,以下 SCC)<sup>1,2)</sup>な どの原因となる可能性がある. SCC は溶存酸素等の環境 因子, 粒界 Cr 欠乏層や粒界不純物偏析といった材料因子, 溶接や機械加工による残留応力といった応力の因子の, これら3つの因子が重畳した場合に発生すると言われて いる. そのため, SCC の予防策として, 表面の引張り残 留応力を圧縮残留応力に改善するために溶接後にはショ ットピーニング (Shot Peening,以下 SP)<sup>3)</sup>等の表面処 理が施されている. SCC の予防策は, 平らや北村らによ って実験的にその有用性を確認されている.しかし,SP の現象時間は非常に短いため、どのような現象が起こっ ているのかは詳しくわかっていない. また SP に関する解 析的な研究は、小川、渡邊川、岸らによって行われてい るが、いずれの事例においても、SPによる溶接継手の残 留応力場の改質については検討されていないのが現状で ある.

SP 時の残留応力場の改質について検討するためには, ショットの衝突時の力学的な挙動を,動的 FEM 解析を用 いて予測することが考えられる.しかしながら,SP にお いては無数の鋼球が対象物に対して衝突するため,現象 の持続時間が長くなることから動的陽解法 FEM 用いた 場合においても,現実的な計算時間で解析を終えること が難しい. そこで、本研究では理想化陽解法 FEM と呼ばれる解析 手法に注目する.理想化陽解法 FEM は動的陽解法 FEM を基に開発された手法で、静的陰解法 FEM に比べ、圧倒 的に高速かつ省メモリであることが示されている.理想 化陽解法 FEM を用いることで、従来手法では極めて解析 困難な百万要素、100パスを超える大型厚板構造物の多 層溶接の溶接変形や残留応力を、現実的な時間で解析可 能である.

本研究では、理想化陽解法 FEM を用いた SP 時の応力 緩和挙動の予測システムを構築することを目的として、 まず、構造物の動的な力学挙動を解析するために動的問 題における理想化陽解法の定式化を行う.続いて、SP 時 に試験片に作用する衝突荷重分布及びその履歴について 考察する.以上により得られた SP 時の衝突荷重に関する 知見を基に、SP 時の荷重分布モデルを構築し、理想化陽 解法 FEM を用いた動的解析手法に導入することで SP 時 の残留応力緩和挙動を予測可能な解析システムを構築す る.最後に、構築したシステムを試験体の SP 時の力学的 挙動の解析に適用することで、本システムの有用性を示 す.

### 2. 理想化陽解法 FEM を用いた動的解析

本章では, SP 時の応力緩和挙動の予測システムを構築 するために,動的問題における理想化陽解法の定式化を 行う。

時刻 $t + \Delta t$ における運動方程式は

$$[M]\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} + [C]\{\dot{u}\}_{t+\Delta t} + \{Q\}_{t+\Delta t} = \{F\}_{t+\Delta t}$$
(1)

$$\{Q\}_{t+\Delta t} = \int_{V} [B]^{T} \{\sigma\}_{t+\Delta t} dV$$
<sup>(2)</sup>

ここで[M]は質量マトリクス, [*C*]は減衰マトリクスを表 す.式(1)の運動方程式を動的に解くために, Newmark-β 法を適用し, 次式を得る.

$$-\frac{1}{\beta\Delta t} \{\dot{u}\}_{t} - (\frac{1}{2\beta} - 1)\{\ddot{u}\} \\ \{\dot{u}\}_{t+\Delta t} = \{\dot{u}\}_{t} + \{(1 - \gamma)\{\ddot{u}\}_{t} + \gamma[\frac{1}{\beta\Delta t^{2}}(\{u\}_{t+\Delta t} - \{u\}_{t}) \\ = \frac{\gamma}{\beta\Delta t}(\{u\}_{t+\Delta t} - \{u\}_{t}) + (1 - \frac{1}{2\beta})\{\dot{u}\}_{t} + \Delta t(1 - \frac{1}{2\beta})\{\ddot{u}\}_{t}$$
(3)

整理すると

$$[K_{dyn\_imp}]{u}_{t+\Delta t} = \{P\}_{t+\Delta t}$$

$$\tag{4}$$

ただし,

$$[K_{dyn\_imp}] = \frac{1}{\beta\Delta t^2} [M] + \frac{\gamma}{\beta\Delta t} [C] + [K]_{t+\Delta t}$$
  
$$\{P\}_{t+\Delta t} = \{F\}_{t+\Delta t} + [M] [\frac{1}{\beta\Delta t^2} \{u\}_t + \frac{1}{\beta\Delta t} \{\dot{u}\}_t + (\frac{1}{2\beta} - 1) \{\ddot{u}\}_t$$
  
$$+ [C] [\frac{\gamma}{\beta\Delta t} \{u\}_t + (\frac{\gamma}{\beta} - 1) \{\dot{u}\}_t + (\frac{\gamma}{2\beta} - 1)\Delta t \{\ddot{u}\}_t$$
(5)

とする.理想化陽解法 FEM を用いた動的解析では式(4) を解く際に理想化陽解法を用いて計算する.

 $[K] = [K]_{t+\Delta t}$ とし、変位ベクトル {<sup>t+ $\Delta t$ </sup> u} と荷重ベクト ル {<sup>t+ $\Delta t$ </sup> P} を {U}, {P} に書き換え,理想化陽解法を適用 するために,仮想の質量項と減衰項を付加すると次式を 得る.

 $[M_{dum}]\{\dot{U}\} + [C_{dum}]\{\dot{U}\} + [K_{dyn_{imp}}]\{U\} = \{P\}$ (6)

 $\{\dot{U}\},\{\dot{U}\}$ を中央差分で離散化すると以下の式を得る.

$$(\frac{1}{\Delta t_{dum}^{2}}[M_{dum}] + \frac{1}{2\Delta t_{dum}}[C_{dum}])\{U\}$$

$$= \{R\} + \frac{1}{2\Delta t_{dum}}[C_{dum}])\{U\}_{m-1} + [M_{dum}](\frac{2}{\Delta t_{dum}^{2}}\{U\}_{m} - \frac{1}{\Delta t_{dum}^{2}}\{U\}_{m-1}$$
(7)

ただし,

$$\{R\} = \{P\} - [K_{dyn\_imp}] \{U\}_{m+1}$$
(8)

仮想の質量マトリクスと減衰マトリクスは以下のように 定義する.

$$\begin{split} M_{dum}(i,j) &= \alpha K_{dyn\_imp}(i,j) \quad (i=j) \\ M_{dum}(i,j) &= 0 \quad (i \neq j) \\ C_{dum}(i,i) &= 2\sqrt{\alpha} K_{dyn\_imp}(i,j) \quad (i=j) \\ C_{dum}(i,j) &= 0 \quad (i \neq j) \end{split}$$

Table1 Analysis condition of SP.

		Shot	Plate
		(SUS304)	(SUS316)
ρ	$(kg/m^3)$	$7.90 \times 10^{3}$	$7.92 \times 10^{3}$
Е	(MPa)	198500.0	194700.0
ν		0.294	0.285
H'	(MPa)	1474.0	2427.0
$V_0$ (mm/sec)		$-6.00 \times 10^4$	



Fig. 1 Analysis model of SP.

 $M_{dum}(i, j), C_{dum}(i, j), K_{dyn_{imp}}(i, j)$ により質量マト リクス,減衰マトリクス,剛性マトリクスは構成されて いる.また,  $\alpha$ は任意の係数である.

# 3. SP における応力緩和挙動の FEM 解析 3.1 解析モデル\_\_

本節では SP 解析を行う際の解析モデルについて述べ る. Fig. 1 に SP 解析に用いたモデルの要素分割を示す. 節 点数は、ショットが 30,037, 試験片が 173,978 で,要素 数はショットが 28,656, 試験片が 168,168 である. 解析 モデルの形状および寸法に関しては Fig. 1 に示す通り, ショットに関しては半径 0.4mmの球, 試験片に関しては 8mm×8mm×3.2mmの矩形板とした.また,ショットが 衝突する付近の要素サイズは 1 辺 0.4 mm で,深さ方向 1 mm まで 0.4 mm で分割している. 解析に用いた材料にお いては、ショットを SUS304,また,試験片は SUS326 を 想定し,材料条件およびショットの初速度は Table1 に示 すものを仮定した.なお,各定数は,以下の通りである.

```
\rho: 密度, E : ヤング率, <math>v: ポアソン比,

H': 加工硬化係数, V_0: 初速度,
```

## 3.2 ABAQUS を用いた SP 解析

SPのFEM解析を実施するにあたり,汎用FEM解析ソフトABAQUS-V6.13を使用した.また,解析条件として,接触モデルはラグランジュの未定乗数法を用い,摩擦は考慮しないものとして解析を実施した. 解析ケースはショット及び試験片がともに弾性または弾塑性体の場合と,試験片は弾塑性体でショットが弾性体の計2ケースを用いて解析を実施した.



 $_{-200}$  (d)  $1.02 \times 10^{-5}$ sec (d)  $1.03 \times 10^{-5}$ sec (d)  $1.20 \times 10^{-5}$ sec Fig. 2 Distribution of stress in y direction.



Fig. 4 Residual stress distribution in thickness

## 3.3 解析結果

ショット及び試験片がともに弾塑性体の場合における y 方向とz 方向の応力分布を Fig. 2, 3 示す. 2 つのケー スごとの衝突中心における表面からの深さ方向の残留応 力 σ<sub>x</sub>成分の分布を Fig. 4 に示す. Fig. 2, 3 より, ショッ トが衝突した後に、試験片には圧縮の残留応力が付与さ れていることから、この SP 解析は妥当性が示された.ま た, Fig.4より, ショットが弾性体であるほうが表面から 深いところまで圧縮残留応力を付与できていることがわ かる.これは、試験片が塑性変形する場合、衝突時のエ ネルギーが塑性変形により吸収されるため大きな反力が 生じないが、ショットが弾性体の場合は、ショットが塑 性変形しないため, 弾性変形の生じている領域において は変形に伴い大きな応力が発生するためであると考えら れる.実際のSPの施工においては、ショット及び試験片 として鋼が使用されるため, 弾塑性解析時における衝突 荷重分布及び履歴を基に SP 時荷重分布モデルを構築し, 理想化陽解法 FEM を用いた動的解析手法に導入する.

#### 3.4 荷重分布モデルの考察

3.3 節より得られた結果から, Fig.5 のような荷重分布 モデルを考える.まず, 衝突時(t=t<sub>1</sub>)に衝突中心に圧力が 発生する.そして, 試験片が弾性的に変形する際, 試験 片には衝突の中心にピークを持つように圧力分布が作用 し, 衝突の中心部が塑性変形を始める中心付近での圧力 が低下し, 周囲の圧力が上昇する.さらに,ショットが 跳ね返る瞬間(t=t<sub>5</sub>)は, 塑性変形を生じている領域が広が り, その周りでは弾性変形なので圧力は高くなっている と考えられる.そしてショットが跳ね返る直前



(d) 1.02 × 10<sup>-5</sup>sec (d) 1.03 × 10<sup>-5</sup>sec (d) 1.20 × 10<sup>-5</sup>sec
 Fig. 3 Distribution of stress in z direction.



Fig. 5 Approximate function of a load distribution model every time. では、中心では塑性変形し、圧力が低くなるがその周り では弾性変形なので圧力は高くなると考えられる.そし てショットが離れると圧力が解放されるというモデルを 考える.これを数式で表すと式(7)となり、また、その式 による、ある時間での荷重分布は Fig. 6 の様に示される ものと仮定する.

$$y = a_6 x^6 + a_4 x^4 + a_2 x^2 + a_0$$
(7)

ただし,

$$a_6 = -10$$
 (8)  
 $a_4 = A_4 (\frac{\kappa}{1-1} - 1)$  (9)

$$a_{2} = 4$$
(10)

$$a_0 = 0.655$$
 (11)

# 4. 理想化陽解法を用いた

# SP における応力緩和挙動の FEM 解析

4.1 SP における応力緩和挙動の FEM 解析結果 前章で構築した荷重分布履歴モデルを用いて,多数の



Fig. 6 Approximate function of a load distribution model every time.



Fig. 7 Behavior of stress distribution in direction on SP

ショットの衝突による荷重を与えた際の応力分布の挙動 について検討する.解析に使用したモデルは,前章と同 様のFig.1に示すものを用いた.SP時の膨大な回数のシ ョットの衝突を模擬するために,同モデルの中心からx,y 方向にそれぞれ1mmの領域に対して無作為に荷重分布を 付与し,動的解析を実施する.なお,ショットは毎秒 5 万回衝突するものと仮定し,施工開始から1.0×10<sup>3</sup>秒ま でを解析対象とした.Fig.7にそのときのx方向残留応力 分布を示す.衝突範囲に圧縮の残留応力が広がっている ことが確認できる.また,Fig.8に表面の中央部における 衝突回数毎の残留応力分布を示し、Fig.9深さ方向の回数 毎の残留応力分布を示す.同図より,回数を重ねる毎に 付与される圧縮残留応力が大きくなっていることが確認 できる.また,衝突回数が増えると残留応力のバラつき も少なくなり,滑らかになる様子が確認できる.

# 5. 結 言

本研究では SP 施工時の応力緩和挙動の解析を目的と して,理想化陽解法 FEM を用いた動的現象の解析システ ムを構築した.また SP のショット衝突時の荷重分布履歴 をモデル化する為に汎用解析ソフトウェアを用いた衝突 解析を実施した.構築した解析システムを用いて,試験 片の SP 施工時の応力挙動を解析した結果,以下の知見を 得た.

 汎用 FEM 解析ソフトである ABAQUS を用いて、ショット衝突時の荷重分布履歴について解析した. 解 析においてはショットおよび衝突対象を弾性体お



よび弾塑性体でモデル化した.その結果,弾塑性体 でモデル化した場合,塑性変形の進行に伴い,中心 部の衝突荷重が低下することがわかった.

- 衝突解析の結果より、ショット衝突時の荷重分布履 歴のモデル化を行った。
- 3) 構築した動的解析システムにショット衝突時の荷 重分布履歴システムを導入した.また、その解析室 手無を試験片のSP時の応力挙動の解析に適用した. 結果本解析システムを用いることでSP時の圧縮残 留応力発生挙動を予測できることを確認した.

# 参考文献

- T. Igarashi, T. Nakazawa, T. Tsuru, Y. Kaji: Development of Extended Semi-Empirical Molecular Orbital Method for Large Scale Metal Systems, The Japan Society of Mechanical Engineers, (2008-11), (21), 424-425
- E. Yamamoto, T, Okazaki: Corrosion Protection and Overly Welding in Chemical Plants, Journal of the Japan Welding Society ,(2008-10), 77(7), 664-669
- Y, Akiniwa, H, Kinura, K, Maruko,, T, Suzuki, K Tanaka:Distribution of Residual Stress and Fatigue Strength of Severe Surface Deformed Steel by Shot Peening, (2007-05-18), (56), (265-266)