

キャビテーション噴流による材料改質の予測法

1. はじめに

キャビテーション噴流は、材料の洗浄・切断・改質といった用途で幅広く活用されている。キャビテーション気泡を含む高速水流を材料に衝突させると、材料の表面近傍で気泡が崩壊し、高い衝撃圧を生じる。この衝撃圧は1GPa オーダにも達することが知られており、その衝撃エネルギーによって材料の洗浄・切断・改質等が促進される。これまで日立GEニュークリア・エナジー(株)と(株)日立製作所は、『ウォータージェットピーニング』という呼称でキャビテーション噴流による材料改質を原子力発電プラントの予防保全に応用してきた⁽¹⁾。ここでは、数値流体解析に基づく最新の材料改質予測法について解説する。

2. 材料改質による応力腐食割れの抑制

金属材料の溶接部には引張残留応力が生じ、材料の鋭敏化・腐食環境との重畳によって応力腐食割れが発生する場合がある。しかし、水中でキャビテーション噴流を溶接部周辺に衝突させると、気泡崩壊時の衝撃エネルギーの作用で残留応力が正の値(引張側)から負の値(圧縮側)に変換され、応力腐食割れを抑制できる。このため、キャビテーション噴流によって材料にどの程度の残留応力を付与できるか知ることが重要である。

そこで、従来はあらかじめ引張残留応力を付与した試験体にキャビテーション噴流を噴射し、X線回折法による圧縮残留応力の計測を実施してきた。しかし、数値流体解析で衝撃エネルギーを予測し、その衝撃エネルギーと圧縮残留応力との間に高い相関性が確認できれば、数値流体解析による圧縮残留応力の予測が可能となる。次章では、開発した数値流体解析技術について説明する。

3. 数値流体解析による圧縮残留応力の予測

著者らは、気泡流モデルを用いた数値流体解析コードを開発してきた⁽²⁾。

本解析コードでは、流れ場中においてマイクロ秒の時間スケールで急激に膨張・収縮する多数の気泡運動の予測が可能である。気泡収縮時に生じる高い内部圧力とその発生位置を予測することで、気泡崩壊時の衝撃エネルギーの分布の見積もりを可能とした。

図1には、原子炉内部の機器を模擬した円柱状構造物に対し、キャビテーション噴流が斜めに衝突する場合の解析結果を示す。ノズルから噴射されたキャビテーション噴流は構造物に衝突した後、構造物の壁面に沿って下流側に広がる。図1(a)はキャビテーション噴流中の主流部分において、多数のキャビテーション気泡の内部が高圧になっていることを表している。また、図1(b)は構造物の壁面上における衝撃エネルギーの予測結果であり、噴流が構造物の壁面に衝突する点O付近からその下流側にかけてエネルギーが高い領域が分布している。

ノズルや構造物の形状、ノズルの構造物に対する距離や角度、噴流の流速、ノズル移動の有無や噴射時間等を変えた20ケースの条件において、解析で得られた衝撃エネルギーと計測した圧縮残留応力を比較した結果、両者に高い相関性が確認されるとともに、衝撃エネルギーを圧縮残留応力に換算する式が得られた⁽³⁾。この換算式を用い、図1(b)の衝撃エネルギーを圧縮残留応力に換算した結果を図2に示す。図2では、図1(b)中に示した検査線上の圧縮残留応力値を示しており、検査線は噴流衝突点Oを原点として構造物の壁面に沿って設けられている。

図2より、キャビテーション噴流の噴射前は噴流衝突点Oと点Bの間で約445~525MPaであった引張残留応力が、噴射後は約-435~-400MPaの圧縮残留応力に変換されている。また、点OA間では点AB間に比べて大きい圧縮残留応力が付与されている。一方、解析結果も計測結果と同様に圧縮残留応力は噴流衝突点に近いほど大きく、予測精度は約±100MPa以

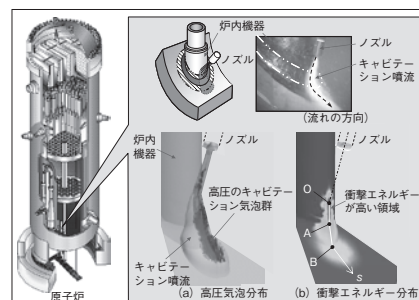


図1 キャビテーション噴流中の高圧気泡と構造物壁面上の衝撃エネルギーの予測結果

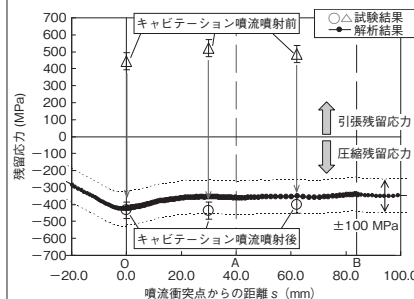


図2 構造物壁面上の圧縮残留応力

内である。このように、数値流体解析に基づき、材料の残留応力改善予測が可能となっている。

4. おわりに

キャビテーション噴流を有効利用した材料改質に関し、数値流体解析を用いた最新の圧縮残留応力予測法を紹介した。本手法を活用して原子力発電プラントの予防保全を効率的に進め、今後も社会インフラの信頼性向上に貢献していきたい。

(原稿受付 2013年2月10日)

[深谷征史 (株)日立製作所]

●文献

- (1) Fukaya, M., ほか, Mitigation of Stress Corrosion Cracking Based on Residual Stress Improvement by Water Jet Peening (WJP), ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Division Conference, (2011), PVP2011-57493.
- (2) Fukaya, M., ほか, Prediction of Cavitation Intensity and Erosion Area in Centrifugal Pump by Using Cavitating Flow Simulation with Bubble Flow Model, Journal of Fluid Science and Technology, 5-2 (2010), 305-316.
- (3) 深谷征史・ほか, 気泡流モデルキャビテーション噴流解析によるウォータージェットピーニング後の平板表面の圧縮残留応力予測, キャビテーションに関するシンポジウム (第16回), (2012-11), S2-8.