

研究成果報告書

研 究 題 目		Peridynamics 粒子法を用いた過大荷重下の 配管部溶接継手の破壊評価に関する研究	実 施 年 度	
			2019	年度
代 表 研 究 者	所 属	広島大学大学院工学研究科		
	氏 名	田中 智行	印	

1. 研究背景・目的

近年、溶接構造物の耐震安全性の要求が高まっている。地震による繰り返し大荷重が配管と構造の接合部などに負荷された場合、大きな損傷が生じることが考えられる。大荷重により鋼構造物が損傷する場合、材料の弾塑性挙動を考慮する必要がある。このような破壊形態を一般的に延性破壊と呼ぶ。延性破壊は比較的大きな変形を許容し、材料も非線形挙動となる複雑な力学現象であり、その定量的かつ高精度な評価が必要となっている。

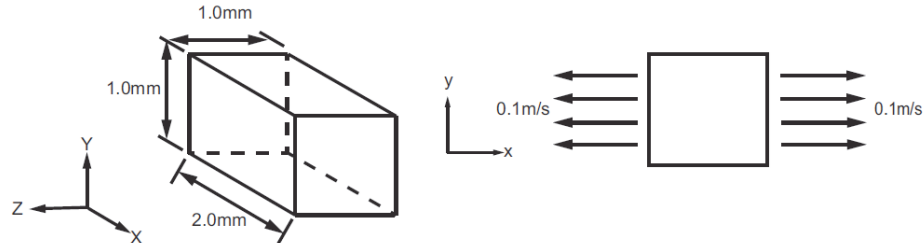
延性破壊の力学挙動を評価する場合、有限要素法（FEM）と呼ばれる構造解析法が多用されてきた。FEM では解析対象を要素と呼ばれる小領域に分割して離散化しているため、大変形によりメッシュが大きく歪んだり、潰れたりするなどの問題が生じる可能性がある。そこで、本研究ではメッシュではなく粒子によってモデルを離散化している Peridynamics (PD) 粒子法 [1] (以後、PD) に注目している。メッシュを用いないことにより要素の大変形に伴う解精度の劣化が低下することが期待される。PD は Silling により考案された新しい理論をもとに力学問題を評価する方法であり、き裂などの変形の不連続を含む評価に適しており世界中で精力的に研究が行われている。

鋼材の延性破壊を評価するにあたって弾塑性モデルが必要になる。PD の弾塑性モデルについても、いくつかの定式化が提案されているが、加工硬化の考慮や 3 次元問題への展開など課題が残るものが多い。さらに、PD でのパラメータの一つである影響関数などが変化すると再定式化が必要であり一般的とは言い難い。また、FEM 等の参照解と比較していないため妥当性が不十分といえるものもある。本研究では、本研究室博士課程後期学生（研究当時）井町 美智也が開発した PD プログラム (PD-I) に弾塑性の定式化を導入したもの、PD のオープンソースソフトウェアである Peridigm、動的陽解法 FEM などと比較・検証を行うことで、PD の弾塑性モデルの妥当性について検討した。

[1] S.A. Silling, Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces, Journal of the Mechanics of the Mechanics of Solids, vol. 48, pp.175-209, 2000.

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

・弾塑性解析モデル：解析対象の一例を以下に示す．下図左に示す $2.0 \times 1.0 \times 1.0$ mm の直方体解析モデルに対して，境界条件として下図右に示すようにモデル両端に強制速度 0.1 m/s を与え続けた．



・弾完全塑性 Peridynamic モデルの妥当性の検証：Horizon および影響関数の違いによる比較を行った．Horizon とは，PD で粒子間の相互作用関係が存在する領域の半径のことであり，ここでは δ とする．異なる Horizon サイズでの比較を行うにあたって， $\delta = m \, dl$ と定義し $m = 2.5, 3.0, 3.5, 4.0$ を用いて比較を行った．ここで dl は粒子間距離を表す．影響関数は，影響半径内のパラメータに重み付けを行わない Constant モデルと距離に応じて，線形の重み付けを行った Linear モデルの 2 パターンを考慮した．Peridigm は Constant モデルのみが実装されている．一方で，今回の定式化では，任意の影響関数を扱えるため，Constant および Linear モデルを取り扱う．PD (Peridigm, PD-I) の解析結果を FEM と比較した．相当応力-相当ひずみ曲線を全体誤差の指標である Global error を用いて比較した．得られた結果を以下の表に示す．PD は一般に影響半径のサイズが解析結果に影響を与えることが知られており，本解析結果からも， m により誤差がばらついていることが確認できる． $m = 2.5, 3.0, 3.5, 4.0$ の平均値を確認すると，PD-I の Linear モデルが最も誤差が低いことが確認できる．すべての解析の中では，PD-I (Linear モデル) の $m = 3.0$ が最も誤差が低い．

	$m = 2.5$	$m = 3.0$	$m = 3.5$	$m = 4.0$	Average
Peridigm	17.8%	9.03%	3.43%	10.9%	10.29%
PD-I (Constant モデル)	3.98%	4.85%	8.20%	4.50%	5.38%
PD-I (Linear モデル)	5.60%	1.84%	7.13%	4.65%	4.80%

・等方硬化を考慮した弾塑性 Peridynamic モデルの妥当性の検証：Horizon の違いによる比較を行う．Peridigm は加工硬化が考慮されていないため，PD モデルは Linear モデルのみを使用し，塑性接線係数 $H = 20.0$ として FEM と比較を行った．以下に PD モデルと FEM モデルとの値の差を示し，Global error を用いて比較を行う．以下の結果から $m = 2.5$ が最も FEM に近く妥当性が高いことが分った．

	$m = 2.5$	$m = 3.0$	$m = 3.5$	$m = 4.0$	Average
PD-I (Linear モデル)	0.52%	5.85%	0.83%	2.27%	2.37%

・申請時の目標に対する達成度合：

新しい数値解析手法の研究には現象の定式化，離散化，実装，検証に時間を要する．研究経費をいただき高性能な計算機を手配できたことで研究のスピードアップにつながった．申請時の目標に対する達成度は約 80-90%であり，助成終了後も目標を達成するため研究を継続している．

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

近年，新しく注目されている構造解析法である PD は解析対象を粒子で離散化する．これまで用いられてきた構造解析法である FEM などと比較して，研究段階であること，解析対象のモデル化に多くの粒子が必要であることから高性能な計算機が必要となる．また，解析結果の妥当性の検討のために，汎用 FEM ソフトウェアのライセンス購入が必要であった．

経費の使用結果を以下に示す．いただいた研究経費は本研究を遂行するため有意義に使わせていただいた．まず，大規模解析用に並列計算機およびその環境構築のため PC および PC パーツの購入を行った．また，構造解析ソフトウェアのライセンス購入を行った．旅費として構造解析のための情報収集旅費に使用させていただいた．また，研究材料として，LAN ケーブル，ハードディスクなどの PC 消耗品および印刷用紙に使用させていただいた．また，経費は広島大学の申請者の経理単位で，当大学の規定に基づき決済を行った．

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

本研究で用いた PD の弾塑性モデルに，移動硬化および複合硬化を導入する．導入後は，CT 試験片を用いた実験結果と PD による解析結果との比較を行い妥当性の検証を行っていく．現段階では数値解析手法として完全には確立されていない延性破壊の評価に適用する．

PD は近年新しく提案された構造解析法であり，物体や構造物が壊れる現象に利点を持っている方法である．当研究室ではさまざまな力学問題に対して PD をはじめとするメッシュフリー法や粒子法と呼ばれる解析技術の研究を行っている．現在，産業界では FEM を用いた構造解析，構造設計が行われてきており，FEM では評価することが容易でない解析対象が大きく変形する問題，飛散，破壊する問題に対してロバストかつ高精度な評価法の研究を引き続き行ってゆく．応用問題として産業界で課題となっている力学現象の解析および評価を目標とする．

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

本研究で得られた成果について、現在、解析結果について詳細に吟味している段階である。まとまった研究成果となった場合、国内外で開催される学会発表（日本機械学会計算力学講演会など）および、学術誌（日本機械学会論文集など）への論文投稿を行う予定である。