

引張クラックを考慮した3次元高精細有限要素モデル による原子力発電所の地震応答解析

Seismic Response Analysis of Nuclear Power Plant Using 3D High-Fidelity Model with Tension Crack
Constitutive Model

宮村倫司¹⁾, 小池邦昭²⁾, 吉村忍³⁾, 山下拓三⁴⁾

Tomoshi Miyamura, Kuniaki Koike, Shinobu Yoshimura, and Takuzo Yamashita

1) 日本大学工学部情報工学科 (〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1番地)

2) (株) 先端力学シミュレーション研究所 (〒112-0002 文京区小石川5-5-5 プライム茗荷谷ビル5F)

3) 東京大学大学院新領域創成科学研究科 (〒277-8568 柏市柏の葉5-1-5)

4) 防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

Finite element (FE) seismic response analyses using a high-fidelity integrated model of a nuclear power plant is conducted using ADVENTURE Solid on the supercomputer Fugaku. The high-fidelity finite element mesh employed tetrahedral elements for components such as the pressure vessel, containment vessel, suppression chamber, vent pipes, various supports, and the reactor building. The concrete material within the reactor building and support structures, including the pedestal of the pressure vessel, is represented using a concrete constitutive model with a tensile crack model proposed by Yamashita et al.

Key Words : Parallel finite element analysis, ADVENTURE_Solid, Supercomputer Fugaku, Reinforced concrete, Tension crack model

1. はじめに

著者等は、スーパーコンピュータ（スパコン）「京」により、原子力発電プラントの3次元フルスケール有限要素解析モデル（FEMモデル）の弾性および弾塑性地震応答解析を行った^{[1][2]}。解析対象は福島第一原子力発電所1号機（1F1）であり、東北地方太平洋沖地震において観測された地震動を入力した。これにより、建屋および主要圧力バウンダリー機器の連成効果を考慮した応答を調査することができた。文献[2]では京によれば現実的な時間内で1F1モデルによる弾塑性地震応答解析が可能であることを示したものの、建屋やペダスタル等の鉄筋コンクリート構造物は弾性としていたため、構造工学的には適切なモデル化となっていない。コンクリートは比較的低い荷重レベルであっても引張クラックが発生し、弾性とは異なる応答となることから、本研究では文献[3]で提案された引張クラックモデルを1F1モデルに導入し、スパコン「富岳」（以下、富岳）により計算を行う。

2. 鉄筋コンクリートのモデル化

(1) 引張クラックモデル^[3]

最初に、ひずみ $\tilde{\epsilon}$ を以下のように加算分解する。

$$\tilde{\epsilon} = \tilde{\epsilon}^{\text{el}} + \tilde{\epsilon}^{\text{pl}} + \tilde{\epsilon}^{\text{cr}} \quad (1)$$

ここに、 $\tilde{\epsilon}^{\text{el}}$ は弾性ひずみ、 $\tilde{\epsilon}^{\text{pl}}$ は塑性ひずみ、 $\tilde{\epsilon}^{\text{cr}}$ はクラックに由来するひずみ（以降、クラックひずみ）である。クラックひずみは物理的にはクラック開口変位を要素寸法で除したものに相当する。図-1 に引張クラックを考慮し

たときのクラック面直交方向の応力 $\tilde{\sigma}_{ii}$ とひずみ $\tilde{\epsilon}_{ii}$ の関係を示す。ただし、ひずみ $\tilde{\epsilon}_{ii}$ はクラック面に平行な方向の応力（側圧）とポアソン比の影響により生じるひずみ成分を取り除いたひずみである、このひずみを用いることで3次元応力下のクラックを適切にモデル化できる。

引張軟化曲線 $\tilde{\sigma}_{ii}(\tilde{\epsilon}_{ii}^{\text{cr}})$ は、 $\tilde{\sigma}^{\text{cr}}(0) = \tilde{\sigma}_t$ および $\lim_{\tilde{\epsilon}_{ii}^{\text{cr}} \rightarrow \infty} \tilde{\sigma}^{\text{cr}}(\tilde{\epsilon}_{ii}^{\text{cr}}) = 0$ を満足するように、次式でモデル化する。

$$\tilde{\sigma}_{ii} = \tilde{\sigma}_t \exp(-c \tilde{\epsilon}_{ii}^{\text{cr}}) \quad (2)$$

ただし、定数 c は次式で定義される。

$$c = \frac{\tilde{\sigma}_t l_r}{G_f} \quad (3)$$

ここに、 $\tilde{\sigma}_t$ はクラック発生応力、 G_f は単位面積当たりの破壊エネルギー、 l_r は要素の代表長さであり、これらが引張軟化曲線の材料パラメータとなる。

一方、除荷時の挙動はクラック閉合点指向（図-1 の緑の経路）としており、次式でモデル化する。

$$\tilde{\sigma}_{ii} = \frac{\tilde{\sigma}_{ii,r}}{\tilde{\epsilon}_{ii,r} - \tilde{\epsilon}_{ii,r}^0} (\tilde{\epsilon}_{ii} - \tilde{\epsilon}_{ii}^0) \quad (4)$$

文献[3]では損傷モデルを導入したDrucker-Prager則によりコンクリートの圧壊を表現している。しかし、原子力発電所に想定された範囲内の地震動が入力する場合には、コンクリートの圧壊は発生しないと考えられるため、本研究では圧壊は考慮しない。

(2) 鉄筋コンクリートのモデル化

鉄筋については分散鉄筋モデルとして、直交異方性の弾性体の構成則を考え、これと弾性体に引張クラックモデルを導入したコンクリートのモデルを重ね合わせている。鉄筋の降伏は考慮しない。

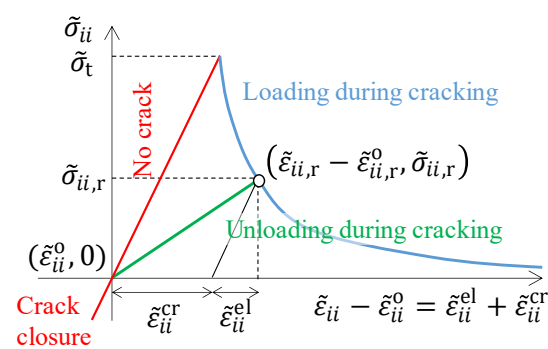


図-1 引張クラックを考慮した応力ひずみ曲線

3. 解析モデル

本研究の解析対象は原子力発電プラント（福島第一原子力発電所1号機）の建屋を含む原子炉全体であり、文献[1]で作成した解析モデルを用いる。この解析モデルでは、原子炉圧力容器、格納容器、サブプレッションチャンバー、ベント管等の主要圧力バウンダリー機器と原子炉建屋およびそれらの接続部をモデル化している。最初に、紙の図面情報から3次元CADモデルを作成する。次に、CADモデルにより定義された形状に対して四面体要素によるメッシュを生成する。作成したメッシュは1次要素によるメッシュ（1次要素モデル＝C1モデル）と2次要素によるモデル（2次要素モデル＝C2モデル）の二種類である。2次要素モデルは1次要素の各辺に中間節点を付加することで作成する。したがって、四面体2次要素の各辺は直線であり、1次要素モデルと2次要素モデルの要素数は同一となる。CADモデルを図-2に、格納容器下部のメッシュを図-3に、メッシュの情報を表1に示す。

原子炉圧力容器やサブプレッションチャンバー内の大量の水、配管やポンプなどの付加的なコンポーネント、様々な積載物をモデル化していないため、それらの質量（付加質量）は密度を割り増すことにより考慮する。鋼製の主要圧力バウンダリー機器の材料を弾塑性材料とする。構成則としてはバイリニア型の等方性硬化則を用いたミーゼス則を用いる。ヤング率、ポアソン比は設計値を参照して決定する。降伏応力、硬化係数はカタログ値を参照して決定する。減衰はレーリー減衰とする。レーリー減衰定数は集中質量系モデルを参考にしてコンポーネント毎に与える。以上の材料パラメータは文献[2]に示したものと同様に設定する。

一方、鉄筋コンクリート構造物である建屋、ペデスタル、原子炉遮蔽壁は、2節に述べた方法でモデル化する。表-2に鉄筋コンクリート部分の材料パラメータを示す。全て

の鉄筋コンクリート製のコンポーネントに対して同じ値を用いる。分散鉄筋モデルのヤング率については、鋼材のヤング率を205 kN/mm²、鉄筋比（断面積の中で鉄筋の断面積が占める割合）を1.3%と仮定し、これらを乗じた値を直交異方性の3方向のヤング率としている。ポアソン比は全て0とし、せん断弾性係数もほぼ0と考えて1 N/mm²とする。この仮定ではモデル化を簡略化するために主鉄筋が全ての点において3方向に入っていると仮定している。

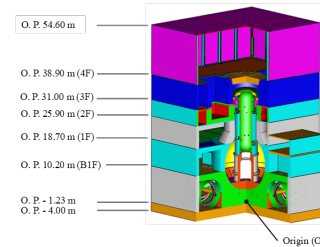


図-2 CADモデル

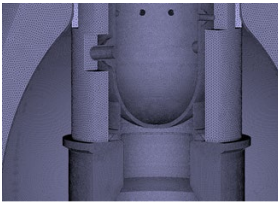


図-3 メッシュ

表-1 メッシュ（解析モデル）

モデル名	C1モデル	C2モデル
要素	四面体1次要素	四面体2次要素
要素数	344,689,808	344,689,808
節点数	67,188,830	499,107,555
自由度数	201,566,490	1,497,322,665

表-2 鉄筋コンクリート部分の材料パラメータ

(a) コンクリート				
ν	ρ [g/cm ³]	l_r [mm]	G_f [mm]	$\tilde{\sigma}_t$ [MPa]
0.2	2.6	100	0.1	2 or 4.54

(b) 鉄筋		
Young's modula $E_{11} = E_{22} = E_{33}$ [kN/mm ²]	Poisson's ratio $\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}$	Shear elastic modulus G [N/mm ²]
2.665	0.0	1.0

4. 富岳による試計算の結果

東北地方太平洋沖地震において1F1の地階で東西（EW）、南北（NS）の並進の加速度時刻歴が観測されている。これらを基に文献[1]の研究では、EW、NS方向の並進と回転（ロッキング）、上下（UD）方向並進の加速度時刻歴を作成し、入力地震動としている。図-4にその中のEWおよびNS方向の並進成分を示す。解析時間の短縮のため、図に矢印で示した区間のみを入力している。本研究においてもこれらの加速度時刻歴を入力する。なお、以下では図-4の横軸の値を時刻として表す。すなわち、解析開始時の時刻は80 sとする。

最初に時間増分を大きく設定（ $\Delta t = 0.2$ s）したC1モデルによる試解析の結果を示す。クラックが発生し易いよ

うにクラック発生応力 $\bar{\sigma}_t$ は小さい値 (2 MPa) としており、分散鉄筋モデルも入れないものとする。図-5に時刻113.6 sにおける結果を、図-6に時刻114.0 sにおける結果を示している。図-4よりこの時刻には地震動の加速度の振幅が大きくなっていることがわかる。図-5ではクラックひずみのコンタと相当応力のコンタを、図-6ではそれらに加えて鉛直方向の直応力成分のコンタも示している。相当応力と直応力については、クラック発生応力の値と同じオーダーの5MPaでコンタの表示が赤になるようにしている。図-6(a)では、図-6(c)の直応力のコンタが赤くなっている領域において引張クラックが発生していることがわかる。建屋が揺れると、それに合わせて引張側の壁面にクラックが発生し、圧縮になるとクラックが閉合することが繰り返し観察されるという結果が得られている。なお、2節に示した引張クラックモデルでは、クラックが閉合したときにそれまでのクラックの発生履歴を保存しないため、繰り返しクラックが発生することによる損傷は表現できない。

次に、時間増分を文献[1], [2]と同様に $\Delta t = 0.01$ としたC2モデルによる解析結果を示す。ただし、ここでは入力加速度を1.2倍にしている。クラック発生応力 $\bar{\sigma}_t$ は、一般的なコンクリートの引張強度 (4.54 MPa) としている。分散鉄筋を入れている。

図-7に時刻81.84 sにおけるクラックひずみと相当応力のコンタを示す。まだ地震動が小さい初期段階であるものの、2階床周辺にクラックが発生している。一方、C1モデルでは、この時刻においてクラックは発生していないことを確認している。図-8にC1モデルおよびC2モデルで引張クラックを考慮した場合と、C2モデルで鉄筋コンクリート部分を弾性とした場合について、原子炉压力容器頂部付近における変位時刻歴を示す。これについては、3個のケースの結果はほぼ同じとなっている。

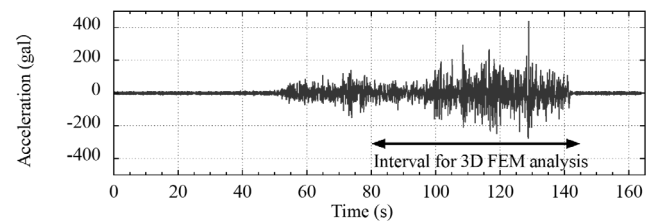
5. おわりに

本研究では、原子炉压力容器、格納容器、サプレッションチャンバー、ベント管等の主要圧力バウンダリー機器と原子炉建屋およびそれらの接続部をモデル化した原子力プラントモデルにおいて、建屋等の鉄筋コンクリート製の構造部材に対して、引張クラックモデルを構成則として導入した。このモデルを用いてスパコン富岳により地震応答解析の試計算を行ったところ、引張直応力が発生する領域においてクラックが発生するという結果が得られた。また、地震により変化する直応力に応じて、クラック発生領域も変化した。

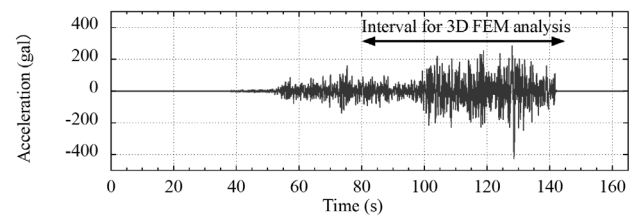
謝辞

本研究は、理化学研究所「富岳」令和5年度一般課題「「富岳」を用いた原子力発電所のフルスケール3次元FEMモデルによるマルチパーパスシミュレーション」(課題番号: hp230061) においてスーパーコンピュータ「富岳」の計算

資源の提供を受け、実施したものである。本研究で使用した引張クラックモデルは、防災科学技術研究所数値震動台研究開発分科会において開発されたものである。

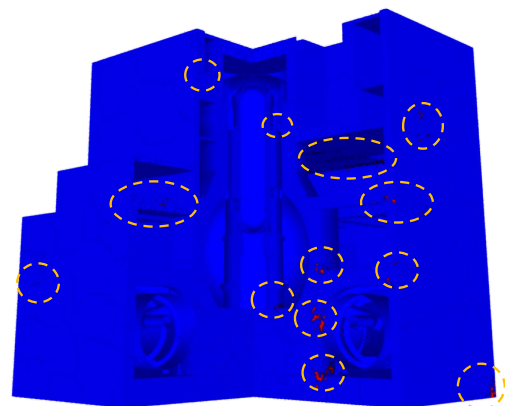


(a) NS 方向並進

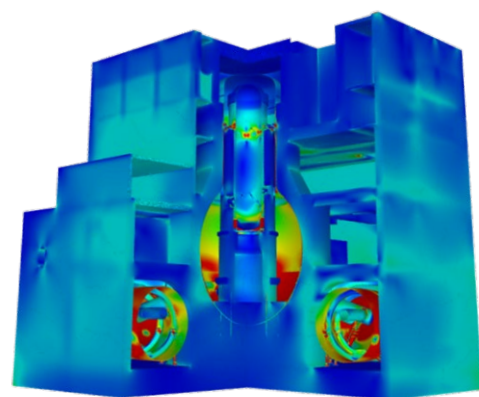


(b) EW 方向並進

図-4 入力地震動^[1]

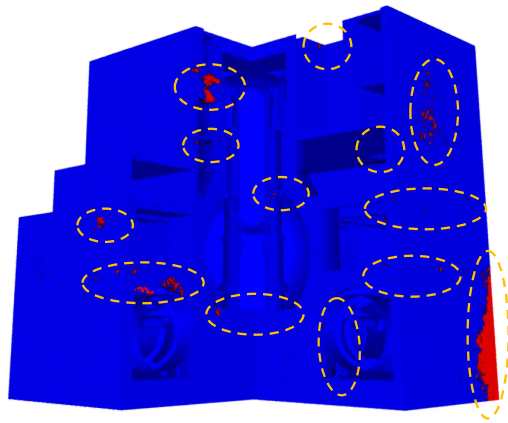


(a) クラックひずみ

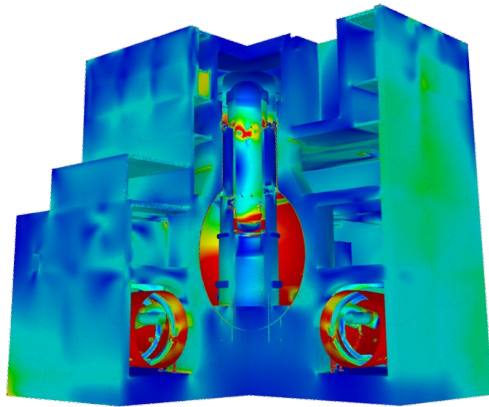


(b) 相当応力 (Min (青) = 0.0 MPa, Max (赤) = 5.0 MPa)

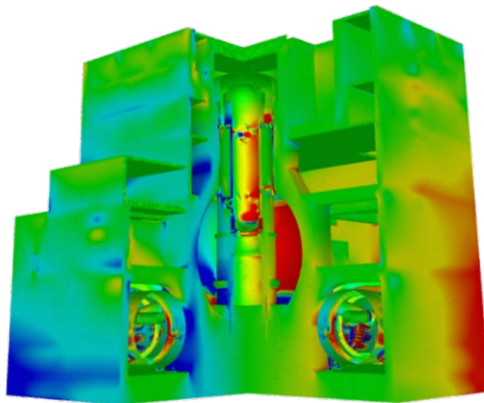
図-5 C1モデル, $\bar{\sigma}_t = 2$ MPa, 鉄筋なし, 時刻113.6s



(a) クラックひずみ



(b) 相当応力 (Min (青)=0.0MPa, Max (赤)=5.0MPa)



(c) 鉛直方向直応力 (Min (青)=-2.0MPa, Max (赤)=+2.0MPa)

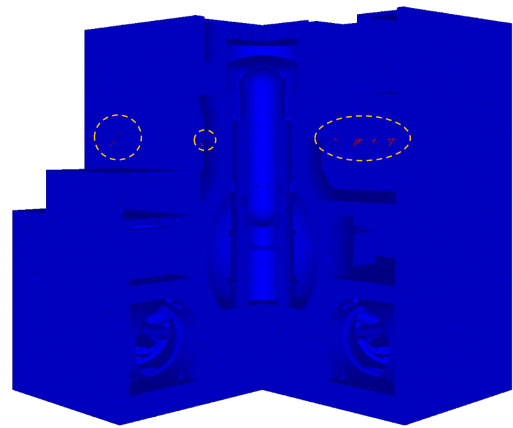
図-6 C1モデル, $\sigma_t=2$ MPa, 鉄筋なし, 時刻114 s

参考文献

- [1] 吉村忍, 宮村倫司, 山田知典, 秋葉博, 清浦英明: 3次元有限要素法による2011年東北地方太平洋沖地震本震時の東京電力福島第一原子力発電所1号機の応答解析 (第1報および第2報), 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 18(3), pp. 135-159, 160-190, 2019
- [2] Miyamura, T., Yoshimura, S., and Yamada, T.: Feasibility study of full-scale elastic-plastic seismic response analysis

of a nuclear power plant, Mechanical Engineering Journal, JSME, Vol. 6 Issue 6 Pages 19-00281 (10 pages), 2019

- [3] 山下拓三, 藤原淳, 宮村倫司: ポアソン効果を考慮した引張クラックモデルの開発とRC構造物の大規模有限要素解析への適用, 日本計算工学会論文集, Vol. 2022, p. 20220006, Paper No.20220006, 2022
- [4] Home page of ADVENTURE Project, <https://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp>
- [5] Web site of Fugaku, <https://www.r-ccs.riken.jp/en/fugaku/>
- [6] Home page of MUMPS: a parallel sparse direct solver, <https://mumps-solver.org/>



(a) クラックひずみ

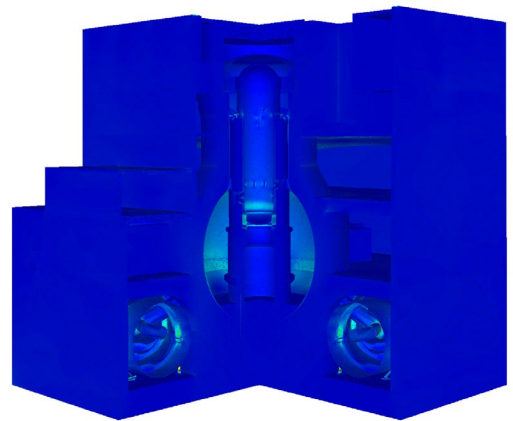
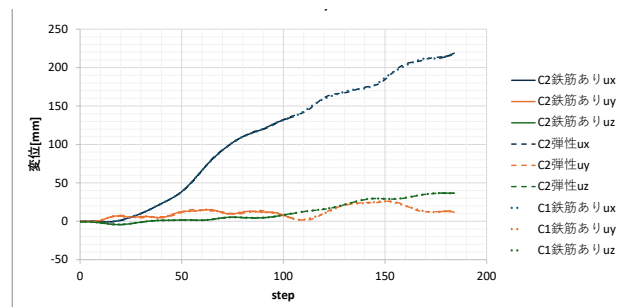
(b) 相当応力 (Min (青)=0.0MPa, Max (赤)=50MPa)
図-7 C2モデル, $\sigma_t=4.54$ MPa, 鉄筋あり, 時刻81.84 s

図-8 原子炉圧力容器上部における変位時刻歴