CDPM2 UMAT
使用マニュアル

Abaqus/Standard の陰解法用 Fortran 実装

2026-11-09

現在の材料モデル、数値更新法、入力・状態変数、実行方法と適用限界を説明します。研究用プレビュー。

Source SHA-256:

d373a8bee58490c07bccce8a60c16cf3c09b1986c1f484f1d84e6c187192fbd0

文書版：2026-11-09。検証結果は検証ガイド、解析事例は例題集、変更経緯は更新履歴を参照してください。

LGPL-2.1-or-later / 無保証

目次

1 CDPM2 の開発者と本プロジェクト 3
1.1 今回開発しているもの . . . 3
2 用語と CDP との違い 4
3 CDPM2 の材料モデル 5
3.1 応力・ひずみと損傷 . . . 5
3.2 応力不変量と降伏条件 . . . 5
3.3 非関連流れ則と膨張 . . . 6
3.4 硬化と圧力依存の延性 . . . 6
3.5 硬化変数と損傷履歴の発展 . . . 7
3.6 引張軟化・破壊エネルギー・特性長 . . . 8
3.7 圧縮軟化と除荷・再載荷 . . . 8
3.8 入力単位・粘性・適用範囲 . . . 8
4 陰解法 UMAT の計算と粘性 9
4.1 局所計算の安定化と接線の確認 . . . 9
4.2 正規化流動と接線 . . . 9
5 導入と実行手順 10
5.1 ビルドと最小例 . . . 10
5.2 結果ファイルからのメッシュ形状読込み . . . 10
5.3 リスタート . . . 11
5.4 接触剛性倍率 . . . 11
6 材料入力と状態変数 12
6.1 材料入力 24 項目 . . . 12
6.2 状態変数 . . . 13
6.3 更新受入れの数値設定 . . . 13
7 利用上の限界と配布 14
7.1 接線とエネルギーの制限 . . . 14
7.2 協力と配布 . . . 14

1 CDPM2 の開発者と本プロジェクト

CDPM2 は Peter Grassl、Dimitrios Xenos、Ulrika Nyström、Rasmus Rempling、Kent Gylltoft が 2013 年に発表したコンクリートの損傷塑性構成則です [1]。その前身は Grassl と Jirásek による 2006 年の損傷塑性モデルで、2013 年論文では CDPM1 と呼ばれています。CDPM2 は引張・圧縮の損傷を分離し、硬化と損傷の関係を拡張しました [1, 2]。

塑性は除荷しても残る変形を、損傷は材料の剛性低下を表します。CDPM2 はこの二つを組み合わせ、引張、圧縮、拘束圧の影響、除荷と再載荷を扱います。

1.1 今回開発しているもの

本プロジェクトは、既存の CDPM2 を Abaqus/Standard の陰解法用 UMAT として Fortran で実装するものです。CDPM2 そのものを新しく提案した研究ではありません。OOFEM の公開 CDPM2 実装を参照し、Abaqus の応力・ひずみ・状態変数・回転・接線の接続を実装しました [3]。OOFEM や SIMULIA の公式 UMAT ではありません。

- CDPM2 原著：材料がどう応答するかを定める構成則。
- OOFEM：参照した既存の公開材料実装。
- 本 UMAT：Abaqus/Standard の陰解法でその材料応答を使うための Fortran 実装。粘性緩和は追加拡張です。

構成則の実装と実用的な収束性を重視します。実験に合わせるための材料同定は、本マニュアルでは行っていません。

2 用語と CDP との違い

CDP Concrete Damaged Plasticity。本資料では Abaqus 組込みのコンクリート損傷塑性モデルを指します [5]。

CDPM2 Concrete Damage Plasticity Model 2。Grassl らの別の構成則です。CDP のバージョン 2 という意味ではありません。

塑性 除荷後にも残る非可逆な変形。

損傷 剛性が低下する程度を表す内部変数。0 は未損傷、1 は完全損傷に対応します。

硬化・軟化 変形の進行に伴って抵抗が増すこと・減ること。

膨張 塑性変形に伴う体積の増加。CDP の膨張角と CDPM2 の流れ則パラメータは直接換算できません。

拘束圧 試験体の横方向から作用する圧縮圧力。

粘性 本 UMAT では塑性ひずみと損傷を時間的に緩和する追加処理。収束を助ける一方、応答も変化します。

UMAT・DDSDDE UMAT はユーザー材料サブルーチン。DDSDDE は全体 Newton 反復に渡す材料接線行列です。

CDP と CDPM2 はともに塑性と損傷を扱いますが、降伏面、硬化、流れ則、軟化・損傷の対応は同一ではありません。CDPM2 の塑性流れは圧力に依存します。同じ材料定数や粘性値を与えても、同じ応答になるとは限りません。

3 CDPM2 の材料モデル

3.1 応力・ひずみと損傷

CDPM2 は塑性による非可逆変形と、損傷による剛性低下を組み合わせる。以下は Grassl らの原著第 2〜3 節（プレプリント pp.3〜17）と採用した OOFEM 実装に基づき、実装固有の拡張を区別して示す [1, 3]。説明項目は Abaqus の CDP 材料説明 [5] を参考とするが、CDP の構成式を流用するものではない。

引張応力を正とし、入力強度 $f_t, f_c > 0$ はそれぞれ引張・圧縮強度の正の大きさである。ヤング係数 E、ポアソン比 ν による等方弾性と塑性ひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ を用いて、

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbb{C}_e : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p), \tag{1}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - d_t)\bar{\boldsymbol{\sigma}}^{+} + (1 - d_c)\bar{\boldsymbol{\sigma}}^{-}. \tag{2}$$

$\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ は損傷前の有効応力、$\boldsymbol{\sigma}$ は Abaqus へ返す応力である。各有効主応力を $\max(\bar{\sigma}_i, 0)$ または $\min(\bar{\sigma}_i, 0)$ に置き換え、元のテンソル座標へ戻して正負を分離する。d_t, d_c は 0 が未損傷、1 が完全損傷を表す。損傷値は塑性ひずみや実測ひび割れ幅ではない。

3.2 応力不変量と降伏条件

平均有効応力 s、偏差応力 $\bar{\boldsymbol{s}}$、偏差応力ノルム ρ、Lode 角 θ を次式で定義する。

$$s = \tfrac{1}{3}\operatorname{tr}\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \qquad \bar{\boldsymbol{s}} = \bar{\boldsymbol{\sigma}} - s\boldsymbol{I}, \tag{3}$$

$$J_2 = \tfrac{1}{2}\bar{\boldsymbol{s}} : \bar{\boldsymbol{s}}, \qquad J_3 = \det \bar{\boldsymbol{s}}, \tag{4}$$

$$\rho = \sqrt{2J_2}, \qquad \theta = \tfrac{1}{3}\arccos\left(\frac{3\sqrt{3}J_3}{2J_2^{3/2}}\right). \tag{5}$$

圧縮圧力は $p = -s$ であり、拘束圧が増すほど s は負側へ移る。通常分岐では $0 \le \theta \le \pi/3$ である。$\rho = 0$ の静水圧状態は、ゼロで除算せず頂点専用のリターンで扱う。硬化関数 $q_1(\kappa_p), q_2(\kappa_p)$ を用いると、

$$B = \frac{s}{f_c} + \frac{\rho}{\sqrt{6}f_c}, \qquad A = (1 - q_1)B^2 + \sqrt{\tfrac{3}{2}}\frac{\rho}{f_c}, \tag{6}$$

$$F = A^2 + m_0 q_1^2 q_2 \left(\frac{s}{f_c} + \frac{\rho r(\cos\theta)}{\sqrt{6}f_c}\right) - q_1^2 q_2^2, \tag{7}$$

$$m_0 = \frac{3(f_c^2 - f_t^2)}{f_c f_t}\frac{e}{e+1}, \tag{8}$$

$$r(c) = \frac{4(1-e^2)c^2 + (2e-1)^2}{2(1-e^2)c + (2e-1)\sqrt{4(1-e^2)c^2 + 5e^2 - 4e}}. \tag{9}$$

離心率 e は偏差断面の形状を制御する。m_0 は強度と e から計算し、別入力の摩擦角ではない。許容条件は $F \le 0,\ \dot{\lambda} \ge 0,\ \dot{\lambda}F = 0$ である。$q_1 = q_2 = 1$ では Menetrey–Willam の強度包絡面に一致する。拘束圧による強度変化は降伏面に含まれ、解析中に f_c を変更して与えるものではない。

3.3 非関連流れ則と膨張

塑性ひずみは降伏関数 F とは異なるポテンシャル g に従う。

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = \dot{\lambda}\,\frac{\partial g}{\partial \bar{\boldsymbol{\sigma}}}, \qquad \frac{\partial g}{\partial \bar{\boldsymbol{\sigma}}} = \frac{g_s}{3}\boldsymbol{I} + g_\rho \frac{\bar{\boldsymbol{s}}}{\rho}. \tag{10}$$

配布コードの通常分岐の勾配に対応するポテンシャルは、

$$g = A^2 + q_1^2\left[\frac{m_0\rho}{\sqrt{6}f_c} + A_g B_g \exp\!\left(\frac{s-s_0}{B_g f_c}\right)\right], \tag{11}$$

$$s_0 = f_t q_1 q_2/3, \qquad A_g = 3f_t q_1 q_2/f_c + m_0 q_1^2/2, \tag{12}$$

$$B_g = \frac{q_1 q_2(1+f_t/f_c)}{3[\ln A_g + \ln(D_f+1) - \ln(2D_f-1) - \ln(3q_1q_2 + m_0 q_1^2/2)]}. \tag{13}$$

$M = A_g \exp[(s-s_0)/(B_g f_c)]$ とすると、実際に用いる勾配は、

$$g_s = 4(1-q_1)AB/f_c + q_1^2 M/f_c, \tag{14}$$

$$g_\rho = \{A[4(1-q_1)B + 6] + m_0 q_1^2\}/(\sqrt{6}f_c). \tag{15}$$

F と異なり g は Lode 角に依存しない。q_1 を含む係数は採用した OOFEM の `computeDGDInv` による一般化であり、$q_1 = 1$ で原著の式 (22)〜(29) に戻る。ピーク前の一般化までを原著にそのまま記載された式とは扱わない。

$D_f = -\dot{\varepsilon}^p_{\text{lateral}}/\dot{\varepsilon}^p_{\text{axial}}$ は、$q_1 = 1$ の単軸圧縮における無次元の横・軸塑性ひずみ速度比であり、度単位の膨張角ではない。硬化状態を固定して拘束圧を増すと M と体積流れの寄与が低下し、高拘束圧では膨張が抑制される。任意の多軸経路で横・軸の塑性ひずみ比が一定になるわけではない。同様に、CDP の膨張角入力が一定でも、すべての応力状態で塑性ひずみ比が一定とは限らない。$q_1 = 1$ の単軸引張では横方向の塑性ひずみがゼロになるよう較正されているが、全横ひずみがゼロになる意味ではない。非関連流れ則では接線が一般に非対称となるため、例題は `UNSYMM` を指定する。

3.4 硬化と圧力依存の延性

累積変数 κ_p が降伏面の形と大きさを制御する。

$$q_1 = \begin{cases} q_{h0} + (1-q_{h0})(\kappa_p^3 - 3\kappa_p^2 + 3\kappa_p) - H_p(\kappa_p^3 - 3\kappa_p^2 + 2\kappa_p), & 0 \le \kappa_p < 1, \\ 1, & \kappa_p \ge 1, \end{cases} \tag{16}$$

$$q_2 = \begin{cases} 1, & \kappa_p < 1, \\ 1 + H_p(\kappa_p - 1), & \kappa_p \ge 1. \end{cases} \tag{17}$$

q_{h0} は初期降伏面、H_p は有効応力での継続硬化を制御する。損傷が増すため、q_2 が増えていても実応力は軟化し得る。実応力の低下は塑性硬化を停止したことを意味しない。

3.5 硬化変数と損傷履歴の発展

通常分岐では、

$$\dot{\kappa}_p = \frac{\|\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p\|}{x_h(s)}(2\cos\theta)^2, \qquad R_h = -s/f_c - 1/3, \tag{18}$$

$$x_h = \begin{cases} A_h - (A_h - B_h)\exp(-R_h/C_h), & R_h \geq 0, \\ E_h \exp(R_h/F_h) + D_h, & R_h < 0, \end{cases} \tag{19}$$

$$E_h = B_h - D_h, \qquad F_h = (B_h - D_h)C_h/(A_h - B_h). \tag{20}$$

A_h, B_h, C_h, D_h は塑性の延性を制御し、損傷の定数ではない。ノルムはテンソルの Frobenius ノルムであり、工学せん断の配列では $\|\boldsymbol{\varepsilon}^p\|^2 = \sum_i (\varepsilon^p_{ii})^2 + [(\gamma^p_{12})^2 + (\gamma^p_{13})^2 + (\gamma^p_{23})^2]/2$ となる。静水圧リターンは参照実装の頂点規約で扱い、通常分岐の式だけで $\rho = 0$ の計算法を定めるものではない。

$\varepsilon_0 = f_t/E$、$Y = s/f_c + \rho r(\cos\theta)/(\sqrt{6} f_c)$ とすると、相当ひずみは、

$$\widetilde{\varepsilon} = \varepsilon_0 \left[\frac{m_0 Y}{2} + \sqrt{\frac{m_0^2 Y^2}{4} + \frac{3\rho^2}{2 f_c^2}} \right]. \tag{21}$$

単軸引張で $\bar{\sigma}_t/E$、単軸圧縮で $f_t|\bar{\sigma}_c|/(E f_c)$ となり、どちらもそれぞれの基準強度で ε_0 に達する。この正規化は圧縮強度を f_t へ置き換える意味ではない。有効応力がゼロでないとき、圧縮の寄与率は、

$$\alpha_c = \frac{\sum_i \min(\bar{\sigma}_i, 0)^2}{\sum_i \bar{\sigma}_i^2}. \tag{22}$$

純引張で 0、純圧縮で 1 となる。累積尺度は $\dot{z}_t = \dot{\widetilde{\varepsilon}}$、$\dot{z}_c = \alpha_c \dot{\widetilde{\varepsilon}}$ で発展し、最大履歴を κ_t, κ_c とする。対応履歴が ε_0 に達すると損傷が開始する。増分実装には反転時の処理と参照実装の小さな開始許容値を含み、損傷を不可逆に保つ。

各モードの二つの補助履歴が、塑性変形と損傷変形を組み合わせる。履歴が進む能動分岐では、

$$\dot{\kappa}_{t1} = \|\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p\|/x_s, \qquad \dot{\kappa}_{t2} = \dot{\kappa}_t/x_s, \tag{23}$$

$$\dot{\kappa}_{c1} = \alpha_c \beta_c \|\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p\|/x_s, \qquad \dot{\kappa}_{c2} = \dot{\kappa}_c/x_s, \tag{24}$$

$$\beta_c = \frac{f_t q_2 \sqrt{2/3}}{\rho\sqrt{1 + 2D_f^2}}, \qquad x_s = 1 + (A_s - 1)R_s^{B_s}, \tag{25}$$

$$R_s = \begin{cases} -\sqrt{6}s/\rho, & s < 0, \\ 0, & s \geq 0. \end{cases} \tag{26}$$

塑性成分は開始後に加算し、開始をまたぐ増分では開始後の部分を使う。損傷履歴は κ_p とは別である。A_s は圧縮軟化の延性を制御し、$B_s = 1$ で原著の式 (56) に戻る。B_s は OOFEM の拡張である。ρ がゼロに近い場合は小分母規約を使い、ゼロで直接評価しない。単軸の解釈では、非弾性ひずみは $\varepsilon^i = \varepsilon^p + d(\varepsilon - \varepsilon^p)$ であり、塑性ひずみだけではない。

3.6 引張軟化・破壊エネルギー・特性長

二直線の応力・非弾性開口則を、f_t、折点応力 f_{t1}、折点開口 w_{f1}、最終開口 w_f で指定する。

$$T(w) = \begin{cases} f_t - (f_t - f_{t1})w/w_{f1}, & 0 \le w \le w_{f1}, \\ f_{t1}(w_f - w)/(w_f - w_{f1}), & w_{f1} < w \le w_f, \\ 0, & w > w_f. \end{cases} \tag{27}$$

引張損傷は次式の許容範囲内の交点から決める。

$$(1 - d_t)E\kappa_t = T(l_e[\kappa_{t1} + d_t\kappa_{t2}]), \tag{28}$$

$$G_f = \int_0^{w_f} T(w)\, dw = \tfrac{1}{2}(f_t w_{f1} + f_{t1} w_f). \tag{29}$$

l_e が非弾性ひずみを等価開口へ変換する。自動選択では、開始時の最大主ひずみ方向 $\boldsymbol{n}$ に初期節点座標を投影して、$l_e = \max_a(\boldsymbol{x}_a \cdot \boldsymbol{n}) - \min_a(\boldsymbol{x}_a \cdot \boldsymbol{n})$ とする。選択した長さはその後固定する。分散ひび割れ帯の正則化で引張側の寸法依存を抑えるが、離散ひび割れの生成でも、構造応答の完全なメッシュ非依存の保証でもない。コードは開始許容値を初期引張応力にも整合して適用する。上式は意図した軟化包絡線を示す。

3.7 圧縮軟化と除荷・再載荷

圧縮損傷は引張開口則ではなく、正規化した相当ひずみ空間での指数則による。

$$(1 - d_c)E\kappa_c = f_t \exp[-(\kappa_{c1} + d_c\kappa_{c2})/\varepsilon_{fc}]. \tag{30}$$

ε_{fc} は無次元の軟化尺度である。f_t は正規化による係数であり、単調な単軸圧縮の能動分岐での実際の応力の大きさは、この損傷後の正規化応力尺度の f_c/f_t 倍となる。圧縮強度が f_t になる意味ではない。x_s が拘束圧に応じて履歴増加を調整する。圧縮側は l_e で正則化しておらず、局所化によるメッシュ依存性が残り得る。

除荷で損傷は回復しない。塑性ひずみと損傷を固定した単軸除荷勾配は、引張で $(1 - d_t)E$、圧縮で $(1 - d_c)E$ となる。塑性ひずみは応力ゼロの位置を移す。引張から圧縮へ反転すると d_c を使うため、$d_c = 0$ なら $d_t > 0$ でも圧縮剛性が回復する。CDP のような別入力の剛性回復係数は持たない。降伏面内の再載荷では新たな塑性ひずみが生じない場合もある。損傷分布は剛性低下の分布であり、離散ひび割れ経路そのものではない。

3.8 入力単位・粘性・適用範囲

応力・長さ・時間に整合した単位系を用いる。E, f_t, f_c, f_{t1} は応力、w_{f1}, w_f, l_e は長さ、G_f は応力と長さの積である。ひずみ・硬化・膨張・延性パラメータは無次元である。緩和時間 μ は本 UMAT の追加拡張で、速度非依存の CDPM2 本体の式には含まれない。塑性ひずみと損傷を緩和する処理であり、ひずみ速度による強度増加の同定則でも、CDP と同一の粘性でもない。配布版は 3 次元・等方性で、文書に示す Standard 事例を対象とする。温度依存、速度による強度増加、鉄筋付着則、要素自動削除は含まない。

4 陰解法 UMAT の計算と粘性

材料式は第 3 節に示します。最終応力には、粘性が有効なら緩和後の塑性ひずみと損傷を使います。

1. 旧確定状態を保持し、入力と座標回転を確認する。
2. 弾性予測と局所 Newton 法によるリターンマッピングで増分終点を直接解く。
3. 塑性履歴に基づいて損傷履歴を更新する。
4. 必要なら粘性緩和を適用し、応力と DDSDDE を計算する。
5. 受入れ条件を満たした更新だけを確定する。失敗時は旧応力・状態を保持し、外部増分の縮小を要求する。

常時サブステップに分割する方式ではありません。接線は解析的な感度と、難しい局所分岐の数値差分を組み合わせます。

$$z_{n+1}^{v} = \frac{\mu z_n^{v} + \Delta t\, z_{n+1}^{\mathrm{target}}}{\mu + \Delta t}.$$

μ は解析時間と同じ単位を持ち、$\mu = 0$ で非粘性更新になります。緩和対象が異なるため、Abaqus CDP の粘性とは同一ではありません。人工損傷上限 0.99、硬化停止、残留強度の強制平坦化は追加していません。

4.1 局所計算の安定化と接線の確認

局所 4 元連立方程式は列・行のスケーリング後に部分ピボットで解き、成分ごとの後退誤差を確認してから元の尺度に戻します。同じ方程式を解く処理であり、真に特異な行列や非有限値は棄却します。構成則や材料定数は変更しません。DDSDDE の数値確認では、Cauchy 応力の単純な差分ではなく Abaqus の接線定義と比較します。固定した共回転系の材料点では、Kirchhoff 応力の微分を体積比で割る項を含めます。損傷開始などの分岐を跨ぐ摂動は、滑らかな微分の試験とは区別します。

4.2 正規化流動と接線

指数項を対数領域で評価し、流動方向を正規化して塑性乗数を変数変換します。大きな流動成分を直接生成せずに局所方程式を評価するための数値表現です。材料定数、粘性、受入許容値を緩める処理ではありません。通常の初期推定で解が得られない場合、代数的継続法による初期推定を使用します。構成則のサブステッピングではありません。異なる経路の収束解を照合し、複数解保護を適用します。接線には特性長の初回活性化に伴う方向感度を含みます。選択済みの長さは後続の履歴で固定します。正負主応力の分離にはスペクトル差商を使います。丸め誤差程度のゼロでの勾配 1/2 は一般化微分の規約であり、一意な古典微分ではありません。

5 導入と実行手順

対象は Abaqus/Standard、3 次元の非摂動解析、NDI=3、NSHR=3、NTENS=6 です。基本入力は DEPVAR=89、材料定数 24、UNSYMM です。現在の配布ソースによる小規模 C3D8/C3D6、2 スレッド指定、静的リスタートの確認範囲は検証ガイドに示します。MPI、シェル、平面応力、軸対称、ハイブリッド、Explicit、動解析、熱連成、材料 ORIENTATION は本版の検証対象外です。

5.1 ビルドと最小例

正規の Abaqus と対応 Fortran コンパイラを用意します。空の作業フォルダへ配布物の src/cdpm2.f90 と examples/shear.inp をコピーし、コンパイラの自由形式 Fortran 設定を確認します。既存結果を含むフォルダは使用しません。

```
abaqus job=shear user=cdpm2.f90 cpus=1 datacheck interactive
abaqus job=shear user=cdpm2.f90 cpus=1 continue interactive
```

2 行目はデータチェックの正常終了、DAT の完了表示とエラーなしを確認した後だけ実行します。CDPM2_FIL_FILE および CDPM2_GEOMETRY_TABLE を別用途で設定している場合は解除してください。配布 examples の入力と検証ガイドを対応付けて使用します。例題のモデル別入力・実行方法は解析例題集を参照してください。

5.2 結果ファイルからのメッシュ形状読込み

最初の増分開始時に UEXTERNALDB が出力フォルダの jobname.fil を読み、初期全体座標（レコード 1901）と要素の節点接続（レコード 1900）を取得します。メッシュ生成、INCLUDE、節点座標系、インスタンス配置は Abaqus が処理するため、UMAT 側で入力言語を解釈しません。初期形状はメモリに保持し、選択した特性長は損傷開始時に固定します。

自分のモデルで使う場合は、入力ファイルに次の設定を追加してください。`*FILE FORMAT, ASCII` は最初の`*STEP` より前（`*HEADING` の説明文の外）に置きます。`*NODE FILE` と`*EL FILE` は各ステップ内に置き、節点・要素集合による範囲制限は付けません。付属例には設定済みです。出力頻度を大きくして毎増分の結果書出しを避けても、最初の材料計算に必要な初期メッシュ情報は出力されます。

```
*FILE FORMAT, ASCII
** Inside each *STEP:
*NODE FILE, FREQUENCY=999999
U
*EL FILE, FREQUENCY=999999
S
```

形状読込みの対応要素は C3D8、C3D8R、C3D8I、C3D6 です。上記設定により、Abaqus は文字として読める ASCII 形式の`.fil` を出力します。本サブルーチンはそのファイルから節点座標と要素の節点接続を取得します。バイナリ形式の`.fil` には対応していません。必要な情報を読み込めない場合はログにエラーを出し、材料計算を行いません。要素形状を推測して計算を続けることはありません。

通常は現在のジョブの出力フォルダにある `jobname.fil` を自動で使うため、保存先の指定は不要です。別の保存先を使う場合だけ、環境変数 CDPM2_FIL_FILE に絶対パスを指定します。DEPVAR=89 では元の形状を STATEV63–89 に保存し、Abaqus のリスタートで復元します。再開時は元の FIL や外部形状表が不要です。従来

の DEPVAR=62 入力も実行できますが、旧リスタートには追加形状がないため元の明示的な形状表が必要です。リスタート入力で DEPVAR だけを変更して旧保存状態を移行することはできません。材料 ORIENTATION と一般 MPI は未検証です。

5.3 リスタート

89 変数のせん断例は 5 増分ごとにリスタートを書き出します。同じフォルダで次を実行します。

```
abaqus job=shear cpus=1 mp_mode=threads interactive
abaqus job=restart_shear oldjob=shear cpus=1 mp_mode=threads interactive
```

2 番目は examples/restart_shear.inp と同じビルド済み UMAT を使います。この再開入力には後続ステップを明示しています。RESTART READ だけでは保存したステップの継続となり、元入力の後続ステップ全部は継続しません。別フォルダへ移す場合は Abaqus が必要とする通常のリスタートファイルを引き継いでください。追加形状は STATEV に含まれるため、ジョブ名・保存先の変更にも形状表ツールは不要です。*RESTART, WRITE の指定は必要です。静的リスタートを検証対象とし、Riks の自動再開対応は主張しません。同一ソースの 89 状態変数リスタートを試験しています。ただし開始フレームの反力差が検証基準を超えており、全量一致は確認できていません。数値結果は検証ガイドを参照してください。異なるソース版を混在させた再開は保証しません。

5.4 接触剛性倍率

*CONTACT CONTROLS の STIFFNESS SCALE FACTOR は、*SURFACE BEHAVIOR に指定した倍率へさらに掛かります。両方が 0.1 なら合計 0.01 倍であり、0.1 倍ではありません。倍率は一度だけ掛けるか、積を明示してください。同じ倍率でも線形・非線形ペナルティの関係は同一ではありません。反復の接触誤差だけでなく、COPEN の負値に対応する実際の食い込みも確認します。本書は引抜き問題の特定の接触倍率を推奨しません。

6 材料入力と状態変数

配布版の 24 入力と 89 状態変数（材料・仕事用 62 変数と不変形状用 27 変数）。数値例を任意のコンクリートの同定値として転用しない。

6.1 材料入力 24 項目

単位系は N、mm、解析時間 s。応力は N/mm²=MPa、ひずみ・損傷は無次元。強度 fc・ft は正の大きさを与える。応力の引張は正、圧縮は負。成分順序は 11,22,33,12,13,23。ひずみ・塑性ひずみのせん断は工学せん断、応力せん断はテンソル成分。塑性ひずみノルムのせん断重みは 0.5。

PROPS	コードの名称と意味	配布例	単位
1	young、ヤング率	35892.339	MPa
2	nu、ポアソン比	0.2	無次元
3	fc、圧縮強度	35.892339	MPa
4	ft、引張強度	2.71644205	MPa
5	ecc、偏心率	0.525	無次元
6	q0、初期硬化係数	0.3	無次元
7	hp、硬化係数	0.5	無次元
8	dilation、非関連流動の膨張パラメータ	0.85	無次元、角度ではない
9	ah、塑性延性パラメータ	0.08	無次元
10	bh、塑性延性パラメータ	0.003	無次元
11	ch、塑性延性パラメータ	2	無次元
12	dh、塑性延性パラメータ	1e-6	無次元
13	le、特性長の入力値	20	mm、現行の自動選定長とは区別
14	ft1、引張軟化折点応力	0.814932615	MPa
15	wf1、引張軟化折点開口	0.021974493916716565	mm
16	wf、引張軟化終端開口	0.14649662611144376	mm
17	efc、圧縮軟化尺度	1e-4	ひずみ
18	asoft、損傷延性係数	15	無次元
19	bsoft、損傷延性指数	1	無次元
20	damage_tolerance、損傷開始判定の幅	1e-5	無次元
21	cap、旧内部ひずみ刻み上限	1e-6	現経路では互換入力検査のみ
22	h、局所差分幅入力	1e-9	ひずみ尺度
23	budget、旧試行予算	20000	現経路では互換入力検査のみ
24	mu、粘性緩和時間	1e-3	s

PROPS23=20000 は、現行方式で一増分を二万分割する意味ではない。PROPS20 は材料点の損傷開始判定幅であり、構造 FE 全体の収束許容値ではない。

引張は二直線の牽引力–開口軟化、圧縮は損傷履歴と efc を用いた指数型軟化である。塑性硬化、圧縮延性、正負主応力分解と組み合わされるため、これらの値だけを単純な単軸応力–全ひずみ曲線と見なさない。損傷上限 0.99、硬化停止、残留強度の人工平坦化は追加していない。

表の材料値は入力例です。全 24 項目が実験から一意に決まったわけではなく、特定の構造への新たなフィッティングも行っていません。モデルパラメータ、数値パラメータ、ユーザー指定 mu を区別してください。

6.2 状態変数

STATEV	内容
1	状態スキーマ識別値 2
2〜7	全ひずみ、工学せん断
8〜13	非粘性塑性ひずみ、工学せん断
14	塑性硬化変数 kappa
15〜20	非粘性有効応力
21〜26	非粘性損傷後応力。実際の STRESS とは区別
27	相当ひずみ equivalent
28	圧縮重み alpha
29〜30	accumulated、引張/圧縮
31〜32	threshold、引張/圧縮
33〜34	kappaOne、引張/圧縮
35〜36	kappaTwo、引張/圧縮
37〜38	非粘性損傷、引張/圧縮
39	選定済み特性長、mm
40	frame 識別値 386
41〜49	累積回転行列、Fortran 列優先配列
50	台形応力仕事の累積 dot((S_old+S_new)/2,DSTRAN)
51	dot(S_new,total_strain-viscous_plastic)/2 の診断値
52	SDV50-SDV51。厳密な塑性・損傷散逸と断定しない
53〜58	粘性塑性ひずみ、工学せん断
59〜60	粘性損傷、引張/圧縮
61	粘性スキーマ識別値 1049
62	mu。保存状態と入力 mu の一致を検査
63–65	形状スキーマ 2、節点数 6 または 8、予約値 0
66–89	初期隅節点の全体基準座標。6 節点要素の未使用座標は 0

6.3 更新受入れの数値設定

一増分の損傷増加上限は 0.25 です。mu=0 では非粘性損傷、mu>0 では応力に実際に使う緩和後の損傷で判定します。これは増分制御であり、最終損傷の上限ではありません。二つの Newton 収束解の規格化差の上限は 0.001 です。棄却時は応力と STATEV を保持し、PNEWDT=0.5 を返します。応力と硬化で規格化した降伏残差の許容値は 1e-12 を維持します。kappa の残差には、1e-12、kappa 増分の絶対値の 1e-8 倍、現在または旧 kappa の浮動小数点間隔の 8 倍のうち最大値を使い、蓄積値が大きいときの表現不能な絶対精度要求を避けます。引張損傷 STATEV37/59 は損傷分布の表示に使えますが、離散的なひび割れ方向ではありません。UMAT の PE/PEEQ を塑性状態変数の代用にしないでください。

7 利用上の限界と配布

7.1 接線とエネルギーの制限

ゼロひずみ増分の問い合わせでは内部変数を固定した近似接線を返すため、時間緩和を含む完全差分と一致しない既知例があります。初回活性化時には特性長の方向感度を含め、選択後の長さは固定します。全分岐で完全整合の接線とは主張しません。SSE は弾性ひずみエネルギー、SPD は塑性散逸、SCD はクリープ散逸です [4]。本 UMAT はこれらの標準エネルギー出力を更新していません。したがって SSE/SPD/SCD によるエネルギー収支や破壊の消費エネルギーを評価できません。STATEV50–52 も診断値で、検証済みの散逸分解ではありません。これらの出力の未実装は応力更新そのものの未実装を意味しません。

7.2 協力と配布

小さな再現例、環境、材料値・単位、荷重履歴、粘性、ログを共有してください。機密モデルやライセンス情報は添付しないでください。ソースと追加ツール・説明は LGPL-2.1-or-later、無保証です。再配布時は LICENSE と THIRD_PARTY_NOTICES.md を保持してください。OOFEM や SIMULIA による承認を意味しません。第三者の論文・実験図の権利は各権利者に属します。比較図は解析結果と公開図から読み取った数値に基づいて独自に作成したもので、原図や原測定データの再配布ではありません。

参考文献

[1] P. Grassl, D. Xenos, U. Nyström, R. Rempling, K. Gylltoft (2013). CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete. International Journal of Solids and Structures 50, 3805–3816. https://arxiv.org/abs/1307.6998. Figures 11 and 12: PDF p.22. The corrigendum is also considered.

[2] P. Grassl, M. Jirásek (2006). Damage-plastic model for concrete failure. International Journal of Solids and Structures 43, 7166–7196.

[3] OOFEM, concretedpm2.C and concretedpm2.h. Reference commit `1c1dbd2b4b8c95dcc26878bf5009d44ed535e1a6`. https://github.com/oofem/oofem.

[4] SIMULIA Abaqus 2026, User Subroutines Reference: UMAT (STATEV, SSE, SPD, SCD; stress/strain components; convergence rate), `SIMACAESUBRefMap/simasub-c-umat.htm`; UEXTERNALDB (LOP=4), `SIMACAESUBRefMap/simasub-c-uexternaldb.htm`. Keywords: CONTACT CONTROLS, STIFFNESS SCALE FACTOR, `SIMACAEKEYRefMap/simakey-r-contactcontrols.htm`.

[5] SIMULIA Abaqus 2026, Materials, Concrete damaged plasticity. `SIMACAEMATRefMap/simamat-c-concretedamaged.htm`.