# CDPM2 UMAT 解析例題集

目次


## 例題1 2-6

1. 例題の概要 2
2. モデルと形状 2
3. 材料特性 3
4. 接触・境界条件・解析制御 3
5. 曲線と結果 4
6. 断面コンター 5
7. 添付入力と実行方法 6
8. 出典 6

## 例題2 7-11

1. 例題の概要 7
2. モデルと形状 7
3. 材料特性 8
4. 接触・境界条件・解析制御 8
5. 曲線と結果 9
6. 断面コンター 10
7. 添付入力と実行方法 11
8. 出典 11

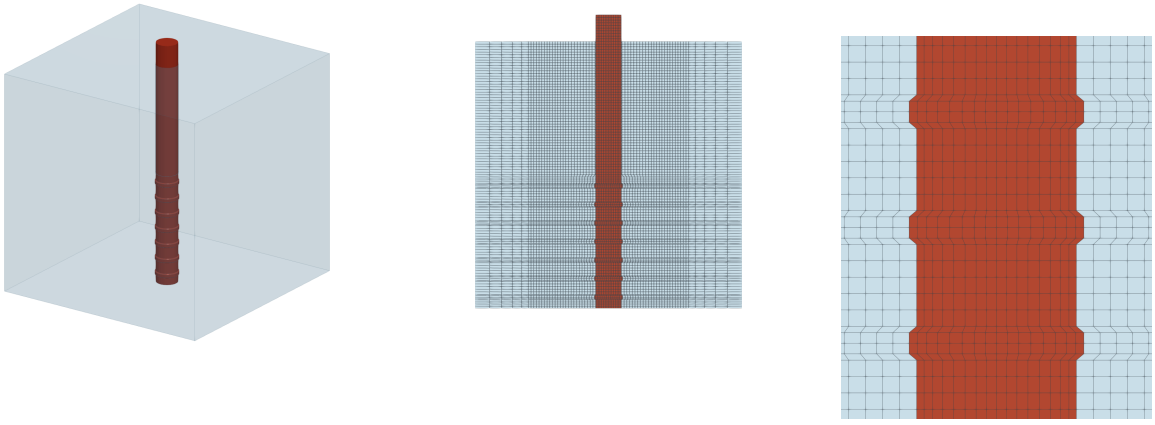
# 鉄筋引抜き解析

Abaqus/Standard：CDPM2 UMAT と組込み CDP の比較

## 1. 例題の概要

リング状リブを持つ鉄筋の引抜きを、Abaqus/Standard の静的陰解法で解析します。CDPM2 UMAT と組込み CDP を用い、同じメッシュ・鉄筋・支持・接触条件で荷重 – すべり応答を比較します。両解析とも載荷変位 2 mm まで完了しています。

Seok の学位論文 [1] と Metelli・Plizzari の引抜き実験 [2] を参考にした例題です。リブはリング状にモデル化し、コンクリート上面全域を鉛直方向に拘束します。



全体モデル　1/2 モデル断面メッシュ　リブ付近の拡大

図 1　解析モデルとメッシュ。

## 2. モデルと形状

| 項目 | 採用条件 |
|---|---|
| 試験体・対称性 | 200 mm 立方体の 1/4：$0 \le X, Y \le 100$ mm、$0 \le Z \le 200$ mm |
| 鉄筋・埋込み | 全長 220 mm、公称径 20 mm、上面から 20 mm 突出 |
| 付着・非付着 | 付着 $Z = 0$–100 mm、非付着 $Z = 100$–200 mm |
| リブ | 芯径 19.2 mm、外径 21.0 mm、高さ 0.9 mm、ピッチ 13.9 mm |
| リブ配置 | 7 本、中心 $Z = 8.3 + 13.9i$ mm（$i = 0, \ldots, 6$） |
| 幅・斜面 | 頂幅 2.55 mm、底幅 4.0604 mm、斜面 50 度 |
| 非付着部 | 平滑鉄筋、半径方向隙間 0.5 mm（スリーブ自体はモデル化しない） |
| 要素・節点 | C3D8R、86,152 要素（鉄筋 6,048 ／コンクリート 80,104）、94,930 節点 |

リブの頂幅と軸方向配置は本例題のモデル化条件です。実験のらせん状リブはリングで近似しています。

## 3. 材料特性

| 項目 | CDPM2 | 組込み CDP |
|---|---|---|
| コンクリート弾性 | $E = 26700$ MPa、$\nu = 0.2$ | |
| 強度基準 | $f_c = 42.7$ MPa、$f_t = 3.4$ MPa | |
| 粘性パラメータ | $\mu = 10^{-3}$ | $\mu = 10^{-4}$ |
| 主な材料設定 | $H_p = 0.01$、$A_s = 5$、$D_f = 0.85$ | 膨張角 30 度、eccentricity 0.1、$f_{b0}/f_{c0} = 1.16$、$K_c = 2/3$ |
| 損傷 | CDPM2 構成則による発展 | ピーク後の応力低下率から設定、引張・圧縮とも上限 0.99 |
| 状態変数 | 89 個 | 組込み材料モデル |

鉄筋は $E_s = 200000$ MPa、$\nu_s = 0.3$、降伏応力 940 MPa の弾完全塑性です。

### 組込み CDP について

CDP（Concrete Damaged Plasticity）は、Abaqus に組み込まれたコンクリートの損傷塑性モデルです。塑性による残留変形と損傷による剛性低下を組み合わせ、引張ひび割れと圧縮破壊に伴う非線形応答を表します。引張・圧縮の応力特性と損傷をそれぞれ入力し、膨張角などの塑性流れのパラメータで多軸応答を定めます [3]。CDPM2 とは別の構成則です。

本例題の CDP では、引張側の基準長を 2 mm とし、引張・圧縮のピーク応力 $f$ と応力 $\sigma$ から、ピーク後の損傷値を

$$d = \min\{0.99, \max(0, 1 - \sigma/f)\}$$

として設定しています。応力表と損傷表の全入力値は `material.inp` に収録しています。

引張応力の下限は 0.034 MPa（引張強度の 1%）、圧縮表の終端は全ひずみ 0.015、応力 4.8912 MPa です。圧縮表の終端以降は応力一定とします。CDPM2 には 0.99 の損傷上限を設けていません。

## 4. 接触・境界条件・解析制御

| 項目 | 設定 |
|---|---|
| 対称面 | $X = 0$ 面の $U_1 = 0$、$Y = 0$ 面の $U_2 = 0$（鉄筋・コンクリート） |
| 支持・載荷 | コンクリート上面全域 $U_3 = 0$、鉄筋上端 $U_3 = 2$ mm |
| 接触 | Surface-to-surface、摩擦係数 0.5、線形ペナルティ |
| 接触剛性 | 標準剛性倍率 0.005（Surface Behavior のみ）。Contact Controls 倍率 1.0 |
| 安定化 | Contact Controls の stabilize=0.01、接線方向比 1.0 |
| 静的増分 | 初期 0.001、全ステップ 1、最小 $10^{-6}$、最大 1.0、上限 100000 増分 |
| 収束制御 | $T_{\mathrm{cont}} = T_{\mathrm{soft}} = 10$。その他の制御値は添付入力に保持 |
| その他 | NLGEOM=YES、非対称行列、hourglass stiffness 55.625 MPa |
| 保存 | 履歴毎増分、場出力 10 増分ごと、リスタート 10 増分ごと |

ステップ時間 1 は数値上の載荷時間です。粘性の効果はこの載荷時間に依存します。接触剛性倍率は本比較の採用値であり、材料定数ではありません。

## 5. 荷重 – すべり曲線と結果

全試験体荷重は 1/4 モデルの鉄筋載荷端反力合計を 4 倍します。横軸は非載荷端鉄筋の平均変位からコンクリート 2 点の平均変位を引いた値です。

$$P = 4 \sum_{\text{REB_TOP}} RF_3/1000 \quad [\text{kN}], \qquad s = \overline{U_3}^{\text{REB_BOTTOM}} - \frac{U_3(50,0,0) + U_3(0,50,0)}{2}.$$

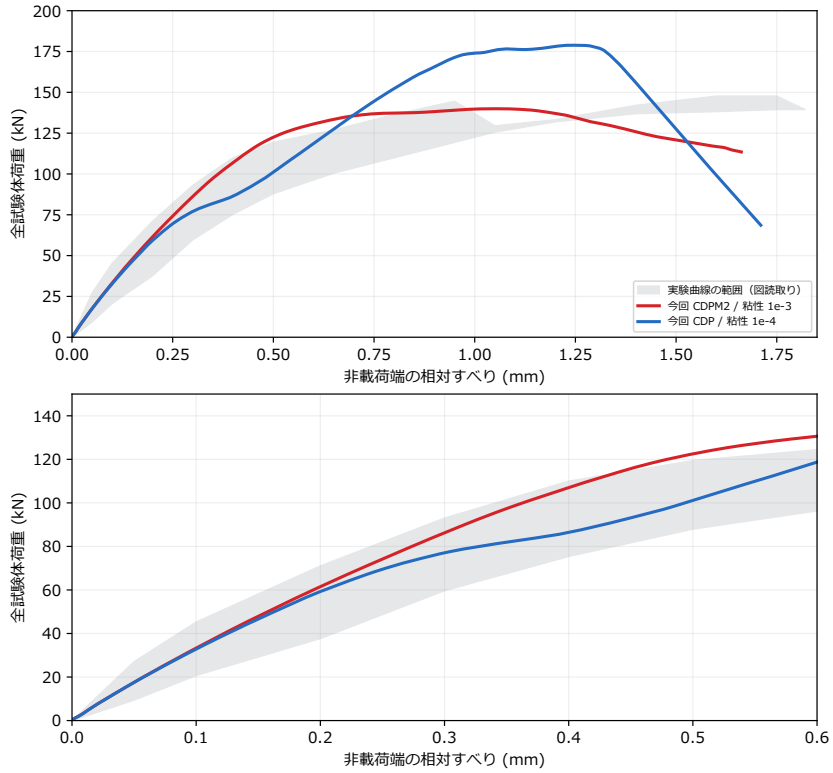



図 2　上：全体比較、下：初期域。灰色帯は Seok [1] p.61 Fig.4.8 に示された実験曲線の概略読取り。元実験は Metelli・Plizzari [2]。平均付着応力は公称面積 $\pi \times 20 \times 100$ mm$^2$ で荷重換算。灰色帯は信頼区間や実験系列全体の範囲ではありません。

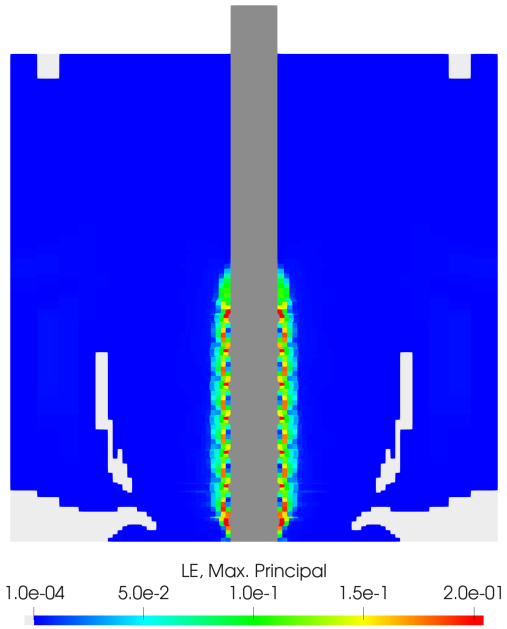
| | CDP | CDPM2 |
|---|---|---|
| 最大荷重 (kN) | 178.85 | 139.95 |
| 最大荷重時すべり (mm) | 1.2456 | 1.0582 |
| 最終荷重 (kN) | 68.62 | 113.47 |
| 最終すべり (mm) | 1.7104 | 1.6620 |

両解析とも載荷変位 2 mm まで完了しました。CDP は CDPM2 より最大荷重が大きく、ピーク後の荷重低下も大きい結果となりました。粘性と多軸構成則が異なる条件での比較です。

## 6. 断面コンター

載荷変位 2 mm 時点の最大主ひずみを、1/2 モデルの断面で比較します。

**CDP：最大主ひずみ**




**CDPM2：最大主ひずみ**

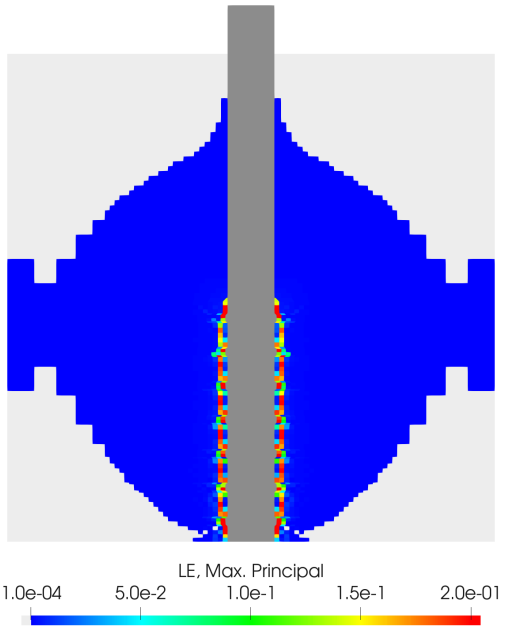



図 3　載荷変位 2 mm 時の最大主ひずみ（LE）。

## 7. 添付入力と実行方法

| ファイル | 内容 |
|---|---|
| `cdpm2.inp` | CDPM2 解析入力（DEPVAR=89） |
| `cdp.inp`、`material.inp` | 組込み CDP 入力と一軸材料表 |
| `mesh.inp` | 共通メッシュ、節点集合、接触面 |
| `../../src/cdpm2.f90` | 共通の CDPM2 UMAT・関連サブルーチン |
| `abaqus_v6.env` | 自由形式 Fortran のコンパイル指定 |
| `extract_curve.py` | ODB から荷重・2 点基準すべりを抽出 |
| `plot_results.py` | 抽出した CDP・CDPM2 曲線の比較図を作成 |

Abaqus と対応 Fortran コンパイラを用意し、入力一式と同じフォルダで実行します。使用ソルバーは Abaqus/Standard 2026 HF0 です。

```
abaqus job=cdp interactive
abaqus job=cdpm2 user=../../src/cdpm2.f90 interactive
```

解析後の抽出：

```
abaqus python extract_curve.py cdp
abaqus python extract_curve.py cdpm2
python plot_results.py
```

`cdp_curve.csv` または `cdpm2_curve.csv` に、時間、載荷端変位、非載荷端変位、2 点基準すべり、全試験体荷重を保存します。`plot_results.py` は NumPy・Matplotlib を用い、抽出した解析曲線を `comparison.png` へ描画します。

CDPM2 の初期形状は ASCII FIL から読み込みます。付属の FIL 出力指定と DEPVAR=89 を維持します。

## 8. 出典

[1] S. Seok, *Finite Element Modeling of Bond-Zone Behavior in Reinforced Concrete*, PhD dissertation, Purdue University, December 2019. Chapter 4, Table 4.1, Figs.4.5, 4.8, 4.9. https://docs.lib.purdue.edu/dissertations/AAI30502919/

[2] G. Metelli, G. A. Plizzari, “Influence of the relative rib area on bond behaviour,” *Magazine of Concrete Research*, 66(6), 277–294, 2014. Tables 1, 5, 6, Fig.2. https://doi.org/10.1680/macr.13.00198

[3] SIMULIA Abaqus 2026: Materials, Concrete Damaged Plasticity（`SIMACAEMATRefMap/simamat-c-concretedamaged.htm`）; Keywords, `*CONTACT CONTROLS`, `*SURFACE BEHAVIOR`, `*DEPVAR`; Scripting, `openOdb`, history output access.

[4] Lattice, CDPM2 UMAT. https://github.com/lattice-naraoka/cdpm2-umat

# 鉄筋引抜き解析：例題2

## 1. 例題の概要

節付き鉄筋の引抜きをAbaqus/Standardの静的陰解法で解析します。CDPM2 UMATと組込みCDPを用い、同じメッシュ・鉄筋・支持・接触条件で付着応力—すべり応答を比較します。

円柱コンクリートの中央285 mmを付着区間とし、リング状の節とスパイラル補強筋をモデル化しています。

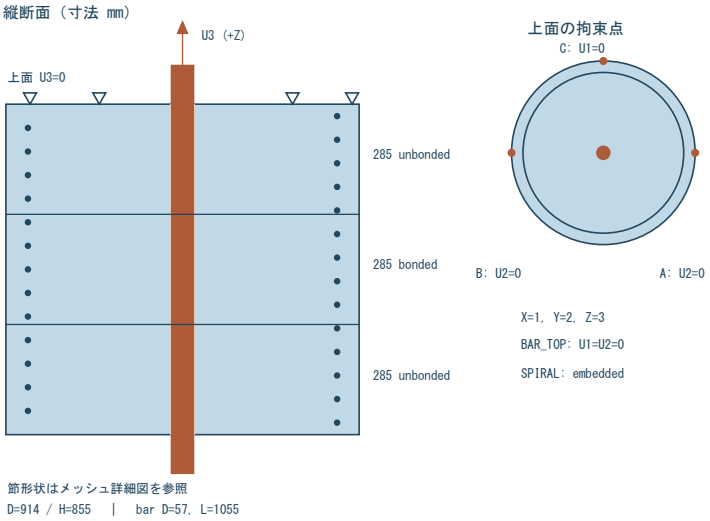



図2-1 モデルと支持・載荷条件。

## 2. モデルと形状

| 項目 | 採用条件 |
|---|---|
| 試験体・対称性 | 直径914 mm、高さ855 mmの円柱・全体モデル |
| 鉄筋・付着区間 | D=57 mm; L=1055 mm; bond Z=285–570 mm |
| リブ | 高さ2.85、頂幅1.40、底幅7.10、ピッチ31.50 mm |
| スパイラル | D=13 mm; outer D=813 mm; pitch=61 mm; 13 turns |
| 要素・節点 | C3D8R + T3D2; 421,248 elements / 441,295 nodes |

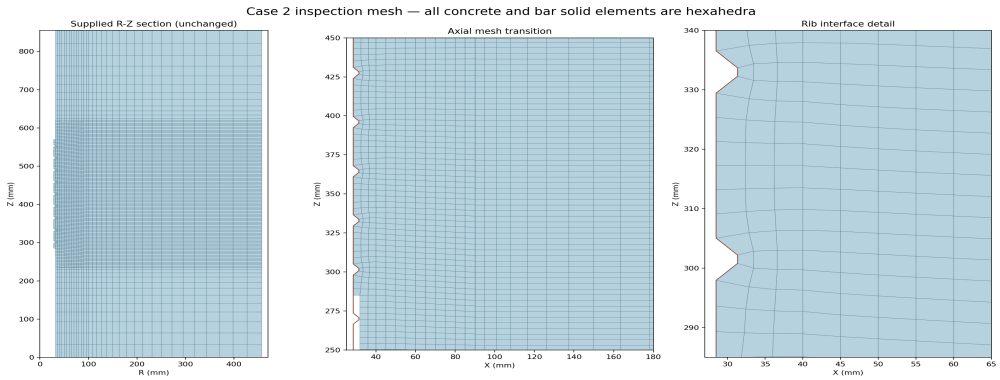



図2-2 断面メッシュ、軸方向の分割遷移、節近傍の詳細。

## 3. 材料特性

| 項目 | CDPM2 | 組込みCDP |
|---|---|---|
| コンクリート弾性 | E=27,600 MPa; nu=0.2 | E=27,600 MPa; nu=0.2 |
| 強度基準 | fc=34.5 MPa; ft=3.5 MPa | fc=34.5 MPa; ft=3.5 MPa |
| 粘性パラメータ | 0.001 | 0.0001 |
| 主な材料設定 | Hp=0.01; As=5; Df=0.85 | dilation=30 deg; ecc=0.1; fb0/fc0=1.16; Kc=2/3 |
| 引張軟化 | Gf=0.089 N/mm; ft1=1.05 MPa; wf1=0.0169524 mm; wf=0.113016 mm | 変位形式の応力・損傷表 |
| 状態変数 | 89 | 組込み材料モデル |

主筋・スパイラル共通：E=200,000 MPa、nu=0.3、公称fy=546 MPa、fu=806 MPa。JSCEの単体鉄筋曲線を参考にしたひずみ硬化付きの仮定曲線です。初期真降伏応力547.49058 MPa、終端塑性ひずみ0.1012083347。331点の塑性表を使用し、破断モデルは含みません。

### 組込みCDPについて

引張・圧縮の応力と損傷を表形式で指定します。圧縮表の終端は全ひずみ0.015、応力2.13589 MPa、損傷0.93809。引張表は変位形式で、応力下限0.035 MPa、損傷上限0.99です。入力値はmaterial.inpに収録しています。

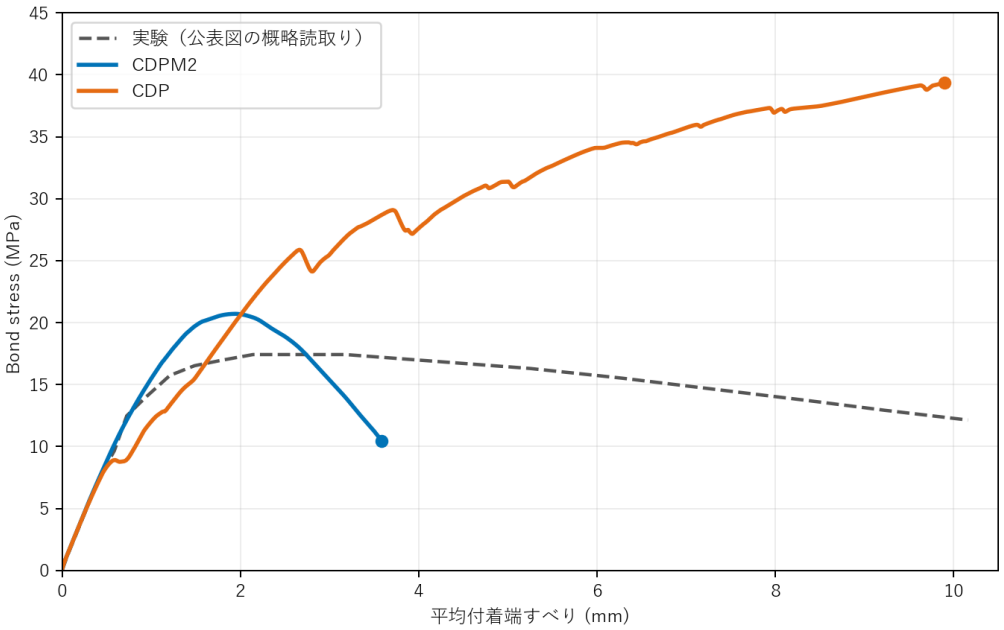
## 4. 接触・境界条件・解析制御

| 項目 | 設定 |
|---|---|
| 支持・載荷 | コンクリート上面U3=0。鉄筋上端U1=U2=0、U3正方向載荷 |
| 剛体運動の拘束 | A(457,0,855): U2=0; B(-457,0,855): U2=0; C(0,457,855): U1=0 |
| 接触・埋込み | Surface-to-surface、摩擦0.5、線形ペナルティ。スパイラルは埋込み |
| 接触剛性・安定化 | Surface Behavior scale=0.005; Contact Controls scale=1.0; stabilize=0.01 |
| 静的増分 | initial=0.001; min=1e-6; max=1.0; max count=100000 |
| 載荷履歴 | 時間10で20 mm。CDPはさらに時間10で40 mmへ |
| その他・保存 | NLGEOM=YES; UNSYMM=YES; hourglass=57.5; history=1; field/restart=10 |

## 5. 付着応力—すべり曲線と結果

荷重Pは鉄筋上端反力の合計、付着応力は $\tau = P/(\pi \times 57 \times 285)$ です。平均すべりは以下で定義します。

```
s = { mean U3(BAR Z285) − mean U3(CONC_BOTTOM)
+ mean U3(BAR Z570) − mean U3(CONC_TOP) } / 2 [mm]
```




平均付着応力 $\tau = P/(\pi dL)$：d=57 mm、L=285 mm。反力の4倍換算なし。
実験：Murcia-Delso et al. (2013), Fig.7(d), Series 3 Test 1。原測定データではない。
上下付着端の相対変位を平均。

図2-3 付着応力と平均すべり。破線はMurcia-Delso et al. (2013), Fig.7(d), Series 3 Test 1の概略読取りです。

| 項目 | CDP | CDPM2 |
|---|---|---|
| 最大付着応力 (MPa) | 39.34226 | 20.71192 |
| 最大時すべり (mm) | 9.90195 | 1.94394 |
| 最終付着応力 (MPa) | 39.34226 | 10.43685 |
| 最終すべり (mm) | 9.90195 | 3.58574 |
| 最終載荷変位 (mm) | 36.55268 | 4.06119 |

CDPM2ではピーク後の低下が見られ、CDPでは掲載範囲の終点が最大値です。粘性と多軸構成則が異なる条件での比較です。

## 6. 断面コンター

保存場出力の引張損傷を縦断面で示します。表示時の載荷変位はCDPM2が4.05946 mm、CDPが27.47550 mmです。

| CDPM2 | CDP |
| --- | --- |
| SDV59; U=4.05946 mm | DAMAGET; U=27.47550 mm |

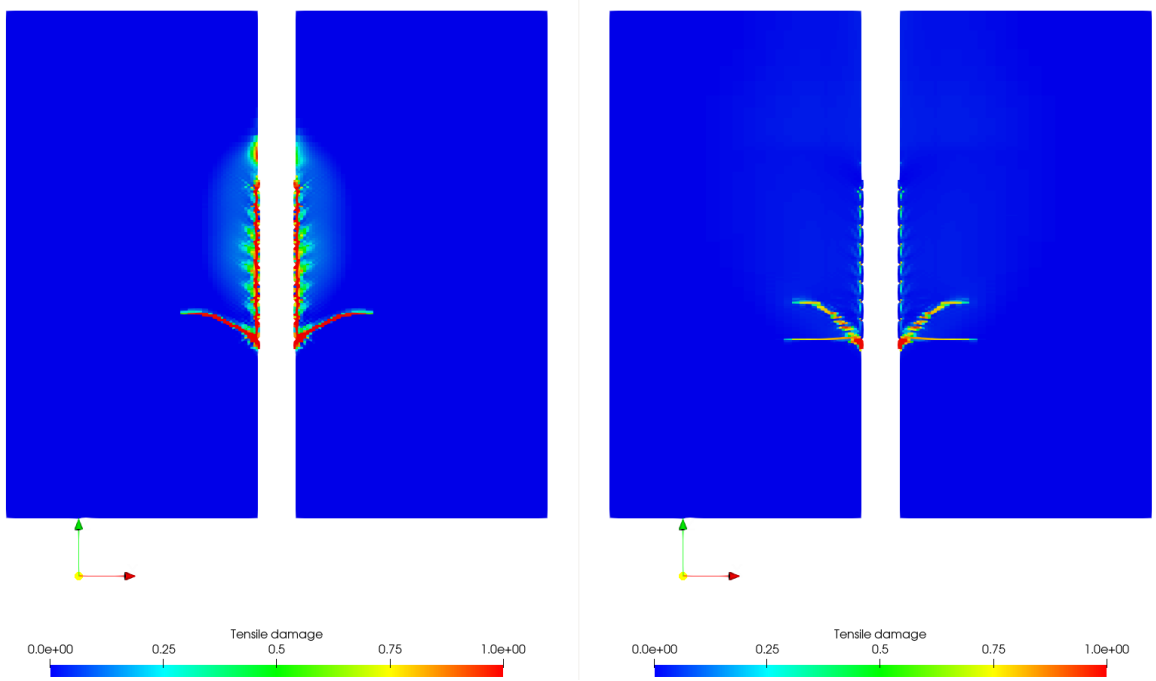



図2-4 引張損傷コンター（左：CDPM2、右：CDP）。同一載荷変位での比較ではありません。

## 7. 添付入力と実行方法

例題2の入力はexamples/pullout/case2/に収録しています。

| ファイル | 内容 |
|---|---|
| cdpm2.inp | CDPM2入力（DEPVAR=89） |
| cdp.inp / material.inp | 組込みCDP入力・一軸材料表 |
| mesh.inp / graph_sets.inp | 共通メッシュ・節点集合・接触面 |
| steel_plastic.inp | 主筋・スパイラルの塑性表 |
| ../../../src/cdpm2.f90 | 配布UMAT |
| abaqus_v6.env | 自由形式Fortranの指定 |
| extract_history.py | ODBから荷重・平均すべりを抽出 |

Abaqusと対応Fortranコンパイラを用意し、入力フォルダで実行します。以下は新規解析用コマンドです。

```
abaqus job=cdp interactive
abaqus job=cdpm2 user=../../../src/cdpm2.f90 interactive
```

### 解析後の抽出：

```
abaqus python extract_history.py cdp
abaqus python extract_history.py cdpm2
```

出力CSVには時間、上下のすべり、平均すべり、荷重、載荷端変位を保存します。初期形状読込みのためFIL出力指定とDEPVAR=89を維持します。

## 8. 出典

[1] Murcia-Delso et al. (2013), Fig.7(d), Series 3 Test 1（実験線の概略読取り）。
[2] 土木学会 コンクリート標準示方書（2022）、第10編 pp.512-513、式2.3.1-5（鉄筋曲線）。
[3] SIMULIA Abaqus 2026: Materials, Concrete Damaged Plasticity; SIMACAEMATRefMap/simamat-c-concretedamaged.htm.
[4] Lattice, CDPM2 UMAT. https://github.com/lattice-naraoka/cdpm2-umat