CDPM2 UMAT 検証ガイド

2026-11-09 | Research preview

グラフ・試験条件・判定結果を含む検証資料

A部はOOFEMとUMATの比較、B部は配布ソースの回帰・追加試験です。対象ソースを区別して掲載します。A部の曲線をB部ソースの再実行結果として扱いません。更新の経緯は別冊の更新履歴にまとめています。

目次	ページ
A OOFEM比較：目的・モデル・材料・載荷履歴	2–5
比較量・判定基準・判定一覧	6–7
応力履歴の比較グラフ	8–11
損傷履歴・追加試験の応答グラフ	12–13
せん断ノルム・座標表現の比較	14–15
再現方法と検証範囲	16
B 配布ソース：312条件の回帰比較	17
材料点・接線試験	18
小規模有限要素試験	19
リスタートと適用限界	20

A部：試験実施版の識別と312条件のOOFEM判定を保持。B部：現行ソースの試験結果と未達基準を掲載。計算の正常終了と数値基準への合格は区別します。

CDPM2 UMAT

Verification Guide / 材料応答の検証

Lattice Co., Ltd. | 2026-10-15

1 検証の目的と結果

Abaqus/Standard用CDPM2 UMATの材料応答を、独立したOOFEMのC++実装および線形弾性の解析解と比較します。材料定数、特性長、ひずみ履歴をそろえ、応力テンソルと引張・圧縮損傷を全履歴で確認します。

項目	実測結果
材料・載荷の組合せ	312
刻み変更を含む比較実行数	342
最新の試験で基準内となった条件	307
最新の試験でも基準未達の条件	5
未評価・未完了の条件	0
載荷履歴 × 材料条件	24 x 13

本資料は、ここに定義した材料応答試験の検証結果を示します。構造物の実験再現性、接触解析の収束性、任意の解析条件への適用性を一括して保証するものではありません。

基準未達の5条件は、損傷履歴に用いる塑性ひずみ増分ノルムのせん断成分の扱いが、公開UMATと参照OOFEM版で異なることに起因します。この定義だけを合わせた診断用コピーでは5条件すべてが基準内となりました。公開UMATは変更せず、元の比較判定も保持しています。切り分け結果は第8節に示します。

Abaqus UMATには全ケースで粘性係数 $\mu = 1.0 \times 10^{-3}$ を使用します。OOFEM参照計算は速度非依存です。載荷時間は1000、基本試験は240等分です。基準未達・未完了の条件には960等分または3840等分の追加試験を行い、初回の結果も残しています。

GitHub: https://github.com/lattice-naraoka/cdpm2-umat

2 モデルと比較条件

各試験片は一辺1 mm（length_2群では2 mm）の六面体1要素です。AbaqusではC3D8、OOFEMではLSpaceを用い、8積分点すべてを評価します。Abaqusのバッチには互いに接続しない試験片をまとめます。試験片間の節点共有、接触、拘束式はありません。

全節点の変位を指定し、空間的に一様なひずみを与えます。側方ひずみも指定するため、一方向載荷のケースも「側面応力ゼロの一軸応力試験」ではありません。本試験では材料接線による全体Newton反復の収束性は評価しません。

AbaqusはNLGEOM=YESのStatic Generalを使用します。各履歴の固定主軸をQ、主ひずみをe_iとして、AbaqusにはF = Q diag(exp(e_i)) Q^Tを、OOFEMにはε = Q diag(e_i) Q^Tを与えます。したがって比較時刻におけるAbaqusの対数ひずみとOOFEMの微小ひずみは一致します。

せん断成分の並びと工学せん断ひずみの換算を行った後に比較します。固定主軸内の非比例履歴を含みますが、主軸が連続回転する履歴や有限回転の客観性試験は含みません。

基準材料	Value
E / ν	30000 MPa / 0.2
f_c / f_t	40 MPa / 3 MPa
e_cc / q_h0 / H_p	0.525 / 0.3 / 0.01
D_f / A_s / B_s	0.85 / 15 / 1
A_h / B_h / C_h / D_h	0.08 / 0.003 / 2 / 1e-6
h / f_t1 / w_f1 / w_f	1 mm / 0.9 MPa / 0.02 mm / 0.15 mm
ε_fc / μ	1e-4 / 1e-3

3 材料条件と載荷履歴

材料条件	基準からの変更
baseline	None
E_low	E = 20000 MPa
E_high	E = 40000 MPa
nu_low	ν = 0.1
fc_high	f_c = 60 MPa
ft_high	f_t = 4.5 MPa; f_t1 = 1.35 MPa
Hp_05	H_p = 0.5
As_5	A_s = 5
As_30	A_s = 30
Df_075	D_f = 0.75
Gf_half	w_f1 = 0.01 mm; w_f = 0.075 mm
Efc_double	ε_fc = 2e-4
length_2	Cube side length L = 2 mm

UMATの特性長hは、初期形状を最大主ひずみ方向に投影した長さです。立方体では軸方向が一辺L、45度のせん断試験では√2 Lとなり、OOFEMにはこの幾何学的参照値を入力します。length_2は形状寸法を2倍にした比較で、複数要素のメッシュ細分化試験ではありません。

全ケースの数値定義はmanifest.jsonと生成スクリプトに収録します。seeded_diagonalの乱数種は1242026です。材料定数は比較試験用に設定したもので、特定の実験への同定値ではありません。

4 載荷履歴一覧

ID	内容
elastic_x	弾性・一方向ひずみ
elastic_hydro	弾性・静水圧ひずみ
elastic_dev	弾性・偏差ひずみ
elastic_xy	弾性・せん断
tension_constrained	側方拘束引張
compression_constrained	側方拘束圧縮
pure_shear_xy	純せん断
reversal_x	引張・圧縮反転
tension_lateral_contraction	側方収縮を伴う引張
compression_lateral_expansion	側方膨張を伴う圧縮
biaxial_tension	二軸引張
biaxial_compression	二軸圧縮
triaxial_compression	三軸圧縮
hydro_tension	静水圧引張
hydro_compression	静水圧圧縮
mixed_sign	引張・圧縮混合
tension_cycles	段階的引張繰返し
compression_cycles	段階的圧縮繰返し
shear_reversal	せん断反転
tension_hold	引張保持・除荷
compression_hold	圧縮保持・除荷
nonproportional_diagonal	非比例・主軸固定
alternating_12cycles	12回の交番繰返し
seeded_diagonal	固定乱数による多軸履歴

5 比較量と判定基準

応力の比較尺度S_0は、引張強度と、そのケースのOOFEM応力テンソル全成分・全時刻・全積分点の絶対値最大との大きい方です。最大誤差は $\max|\sigma_{UMAT} - \sigma_{OOFEM}| / S_0$、RMS誤差も同じ$S_0$で正規化します。

判定項目	許容値
弾性ケース・最大応力誤差	1e-4
非線形ケース・最大応力誤差	0.01 (1%)
応力RMS誤差	0.002 (0.2%)
引張・圧縮損傷の最大絶対差	0.01
指定ひずみとLEの最大絶対差	1e-9
同一要素内の最大応力成分差	1e-7 MPa

弾性ケースは等方線形弾性の解析解でも照合します。非線形損傷は、応力算定に用いる粘性化後のUMAT損傷（SDV59・SDV60）をOOFEM損傷と比較します。完走し、定義した全比較時刻がそろい、全判定を満たす場合のみPASSとします。

FAILは計算が完了しても比較基準を満たさないケースです。INCOMPLETEは履歴未完了、NOT_EVALUATEDは比較に必要な出力がないケースです。計算完了を、そのまま材料モデルの検証合格とは扱いません。

OOFEMの通常テキスト出力の応力表示桁数も誤差に含まれます。判定値は全ケース実行前に定義し、結果に合わせた緩和は行っていません。

時間刻み変更の結果

Test	N	PASS	FAIL	その他
refine_Hp_960	960	22	2	0
refine_Ehigh_960	960	1	0	0
refine_shear_960	960	0	3	0
refine_Hp_3840	3840	0	2	0

判定一覧

この表は追加試験を含む実行単位の集計です。条件ごとの最新判定は冒頭に示し、初回の未達・未完了も本表に保持しています。

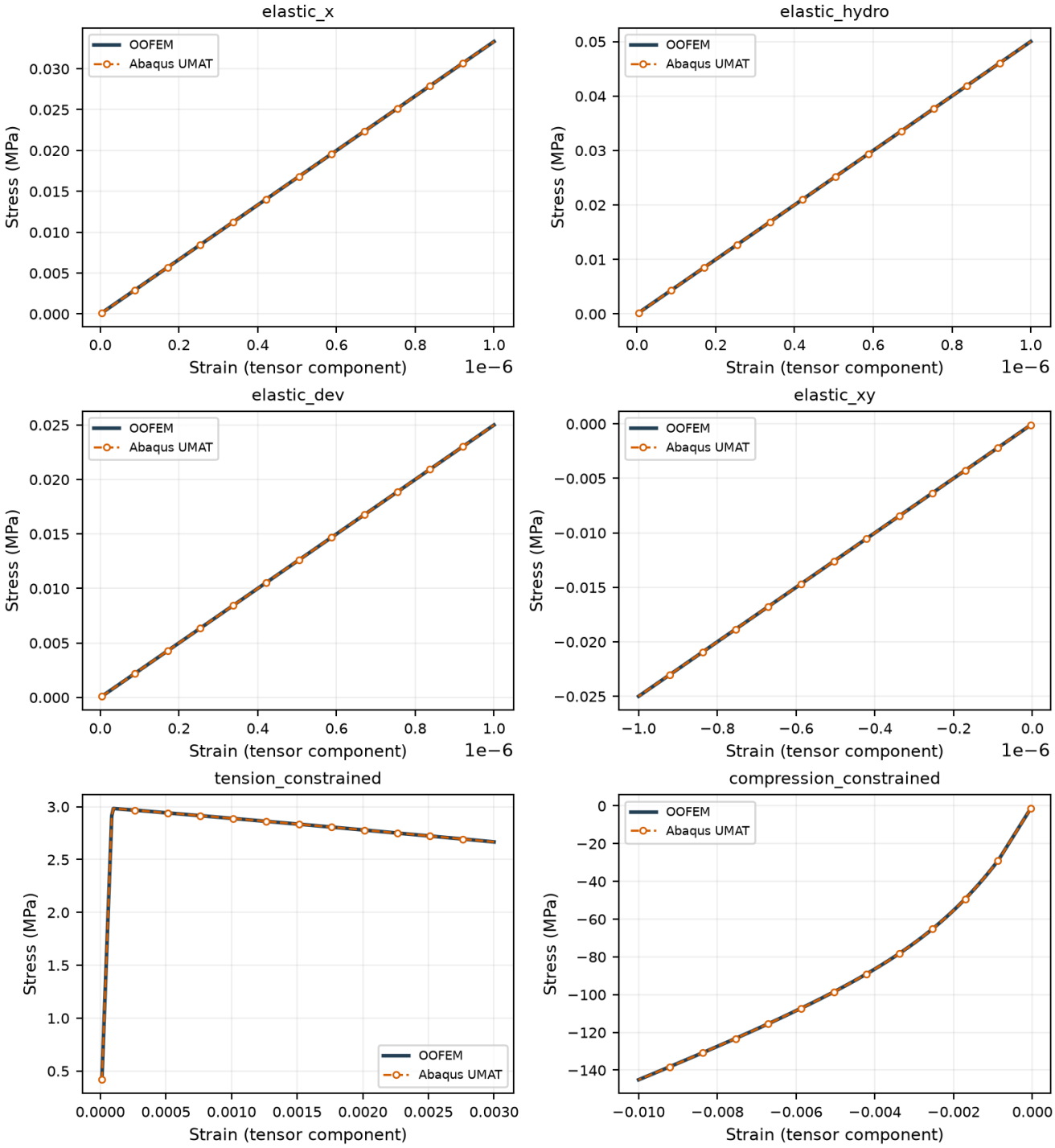
材料条件	PASS	FAIL	その他
baseline	24	0	0
E_low	24	0	0
E_high	24	1	0
nu_low	24	0	0
fc_high	24	0	0
ft_high	24	0	0
Hp_05	22	4	24
As_5	23	2	0
As_30	24	0	0
Df_075	24	0	0
Gf_half	23	2	0
Efc_double	24	0	0
length_2	23	2	0

基準未達・未完了のケース

材料 / ケース	状態と観測値
E_high / compression_cycles (N=240)	FAIL; max stress 1.462e-05; damage 0.001238; GP spread 0.003614 MPa
As_5 / shear_reversal (N=240)	FAIL; max stress 0.0001346; damage 0.02013; GP spread 1.847e-13 MPa
Gf_half / shear_reversal (N=240)	FAIL; max stress 9.489e-05; damage 0.01288; GP spread 1.847e-13 MPa
length_2 / shear_reversal (N=240)	FAIL; max stress 9.489e-05; damage 0.01288; GP spread 1.563e-13 MPa
Hp_05 / pure_shear_xy (N=960)	FAIL; max stress 0.02972; damage 0.003833; GP spread 1.306e-13 MPa
Hp_05 / shear_reversal (N=960)	FAIL; max stress 0.05673; damage 0.004478; GP spread 1.665e-13 MPa
As_5 / shear_reversal (N=960)	FAIL; max stress 0.0001353; damage 0.02004; GP spread 2.345e-13 MPa
Gf_half / shear_reversal (N=960)	FAIL; max stress 9.755e-05; damage 0.01285; GP spread 2.345e-13 MPa
length_2 / shear_reversal (N=960)	FAIL; max stress 9.755e-05; damage 0.01285; GP spread 1.918e-13 MPa
Hp_05 / pure_shear_xy (N=3840)	FAIL; max stress 0.02922; damage 0.003778; GP spread 1.79e-13 MPa
Hp_05 / shear_reversal (N=3840)	FAIL; max stress 0.05439; damage 0.004319; GP spread 1.867e-13 MPa
Hp_05 / 24ケース	バッチ計算が途中停止したため全履歴の判定は未完了。試験片は独立ですが、一つの停止で同じバッチの残りの履歴も中断します。

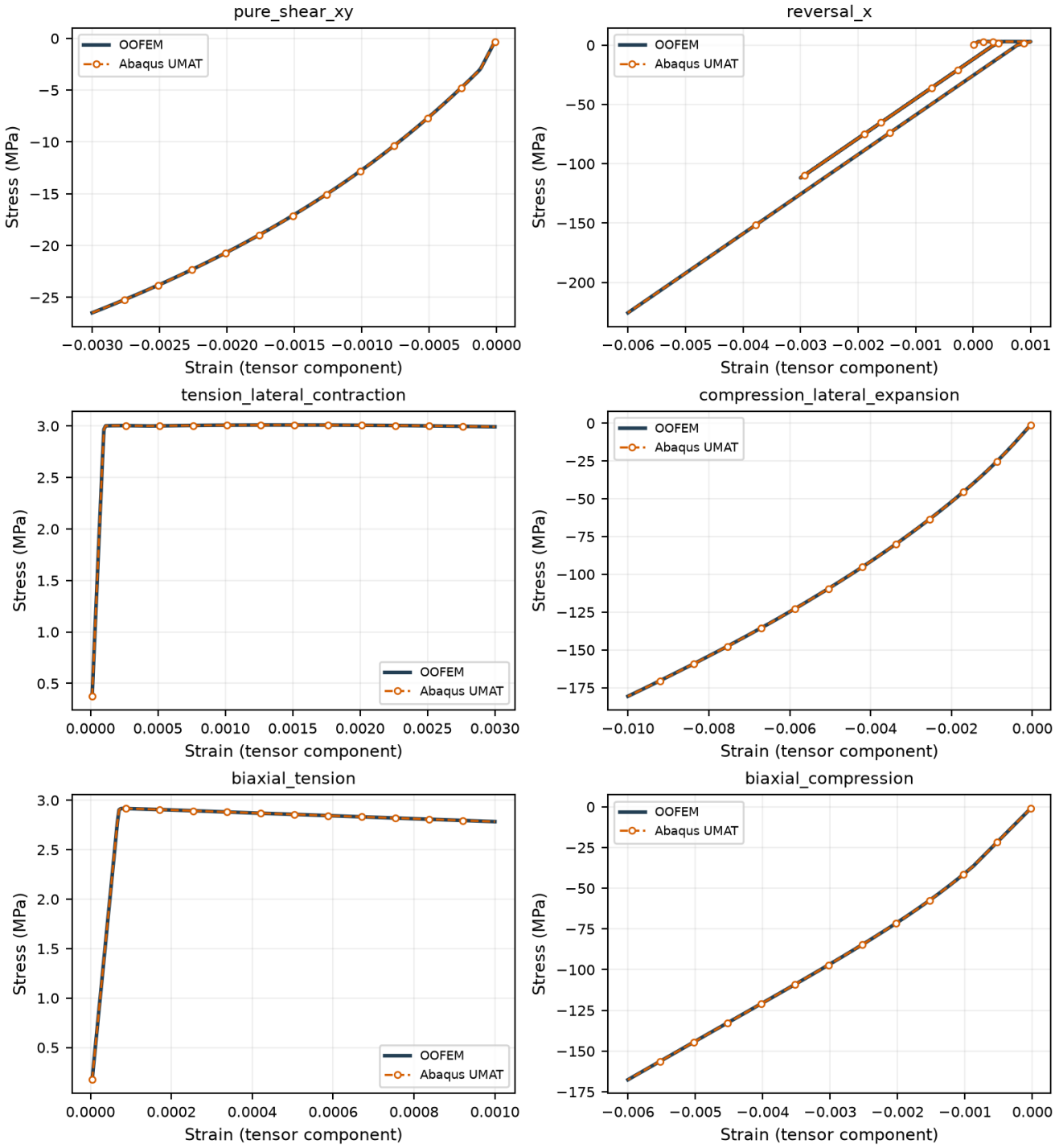
6 応力履歴の比較

基準材料条件。実線：OOFEM、破線：Abaqus UMAT。表示は代表成分、数値判定は全成分・全積分点に対して実施しています。



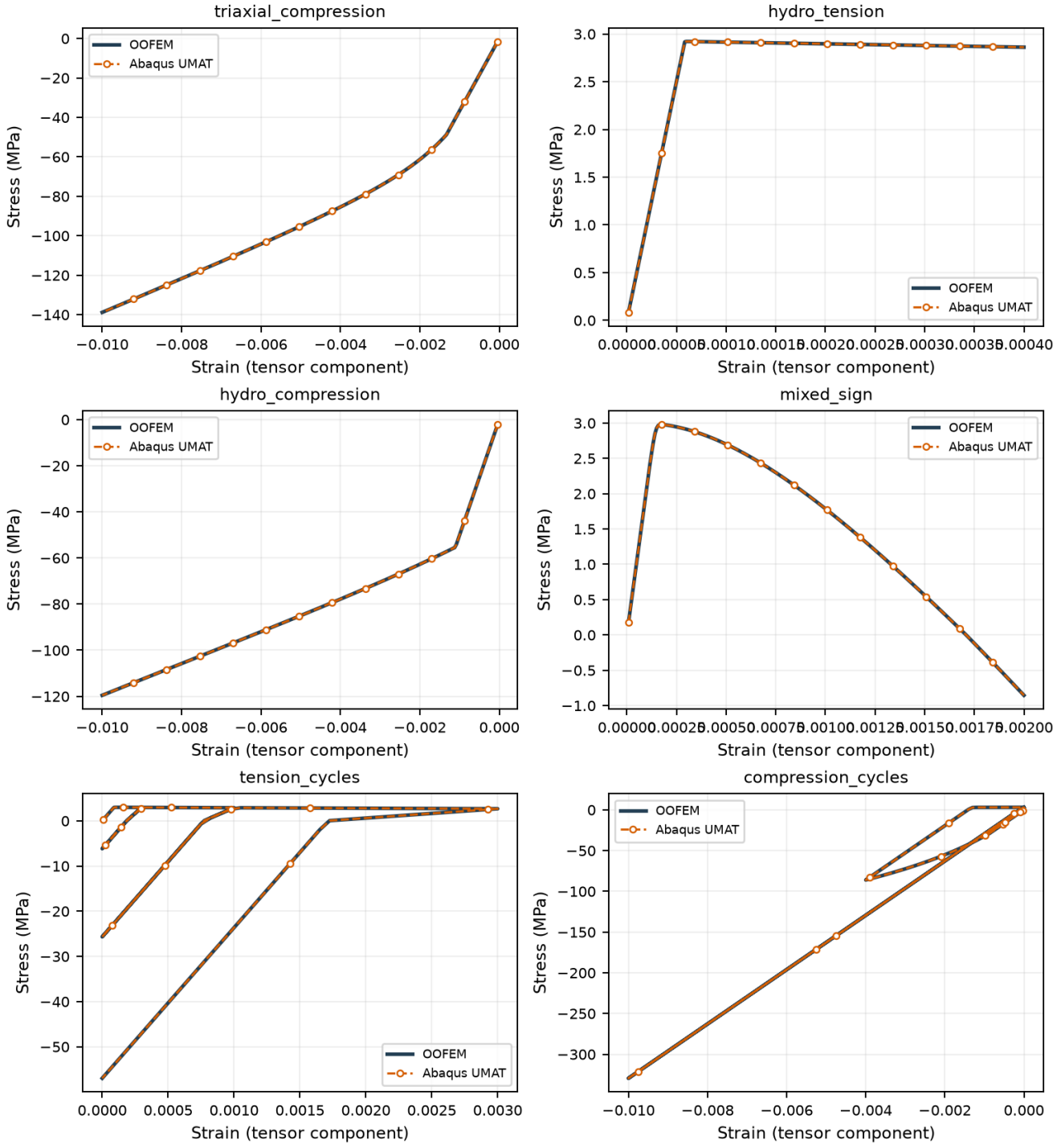
6 応力履歴の比較

基準材料条件。実線：OOFEM、破線：Abaqus UMAT。表示は代表成分、数値判定は全成分・全積分点に対して実施しています。



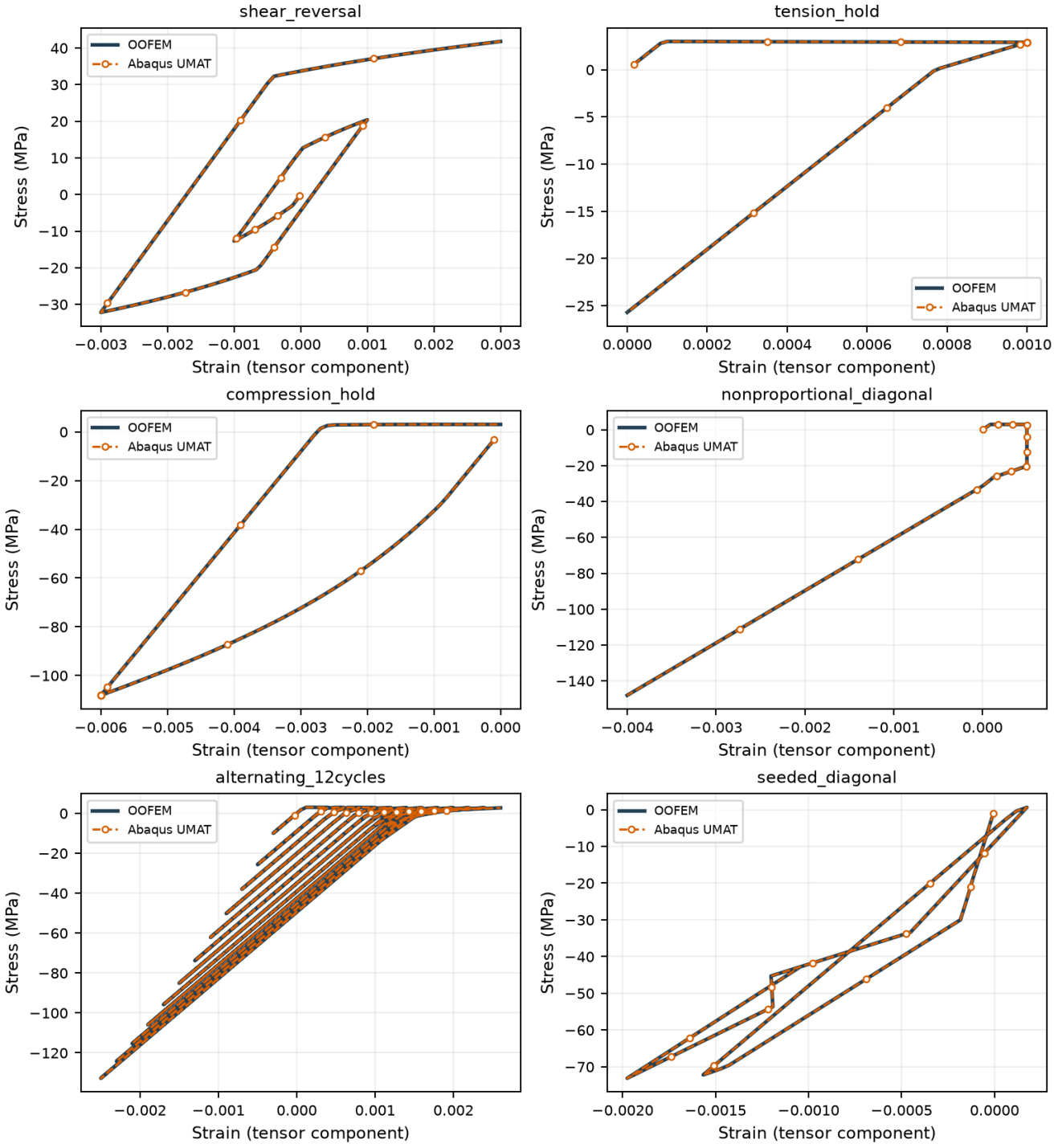
6 応力履歴の比較

基準材料条件。実線：OOFEM、破線：Abaqus UMAT。表示は代表成分、数値判定は全成分・全積分点に対して実施しています。

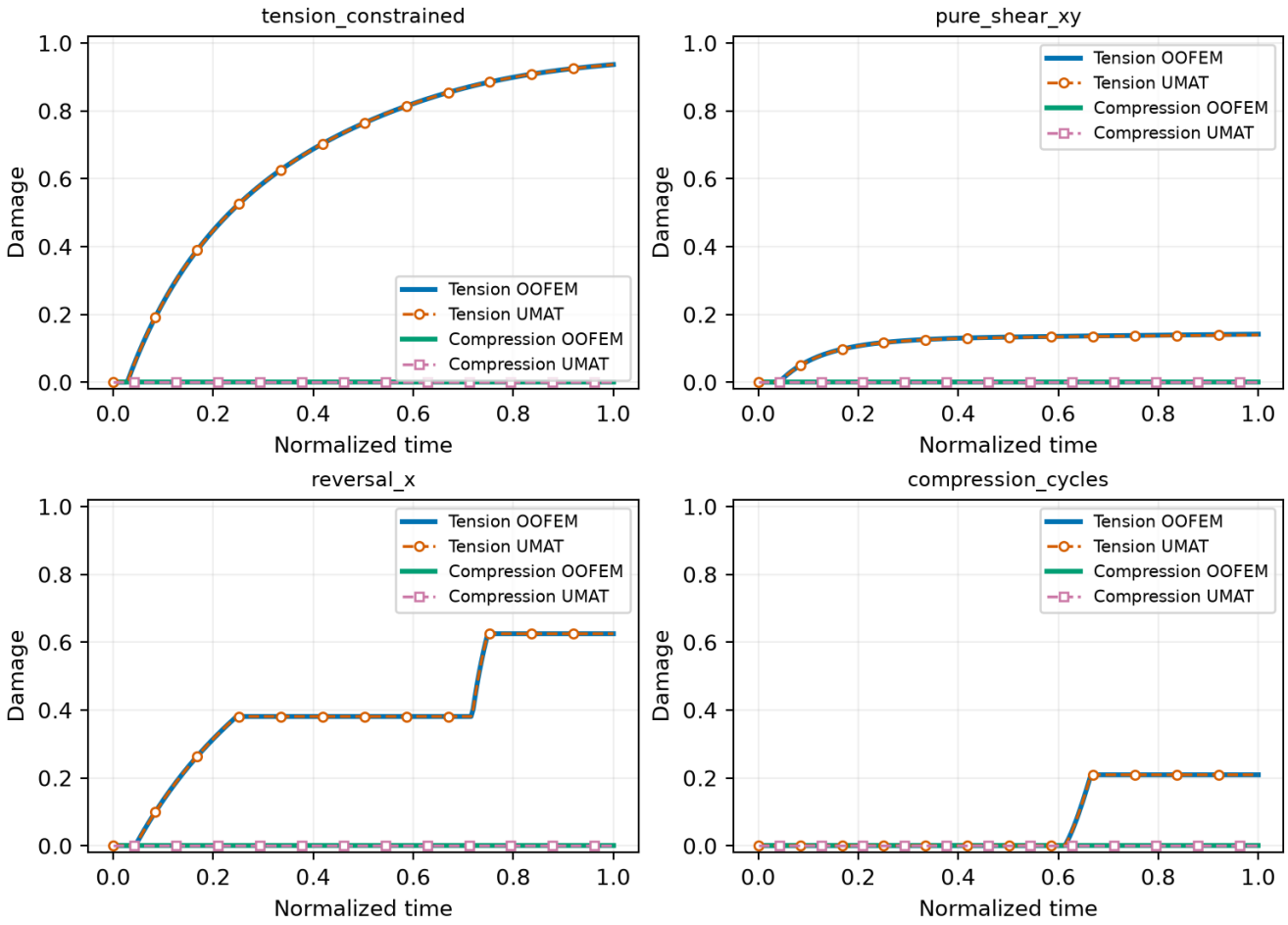


6 応力履歴の比較

基準材料条件。実線：OOFEM、破線：Abaqus UMAT。表示は代表成分、数値判定は全成分・全積分点に対して実施しています。



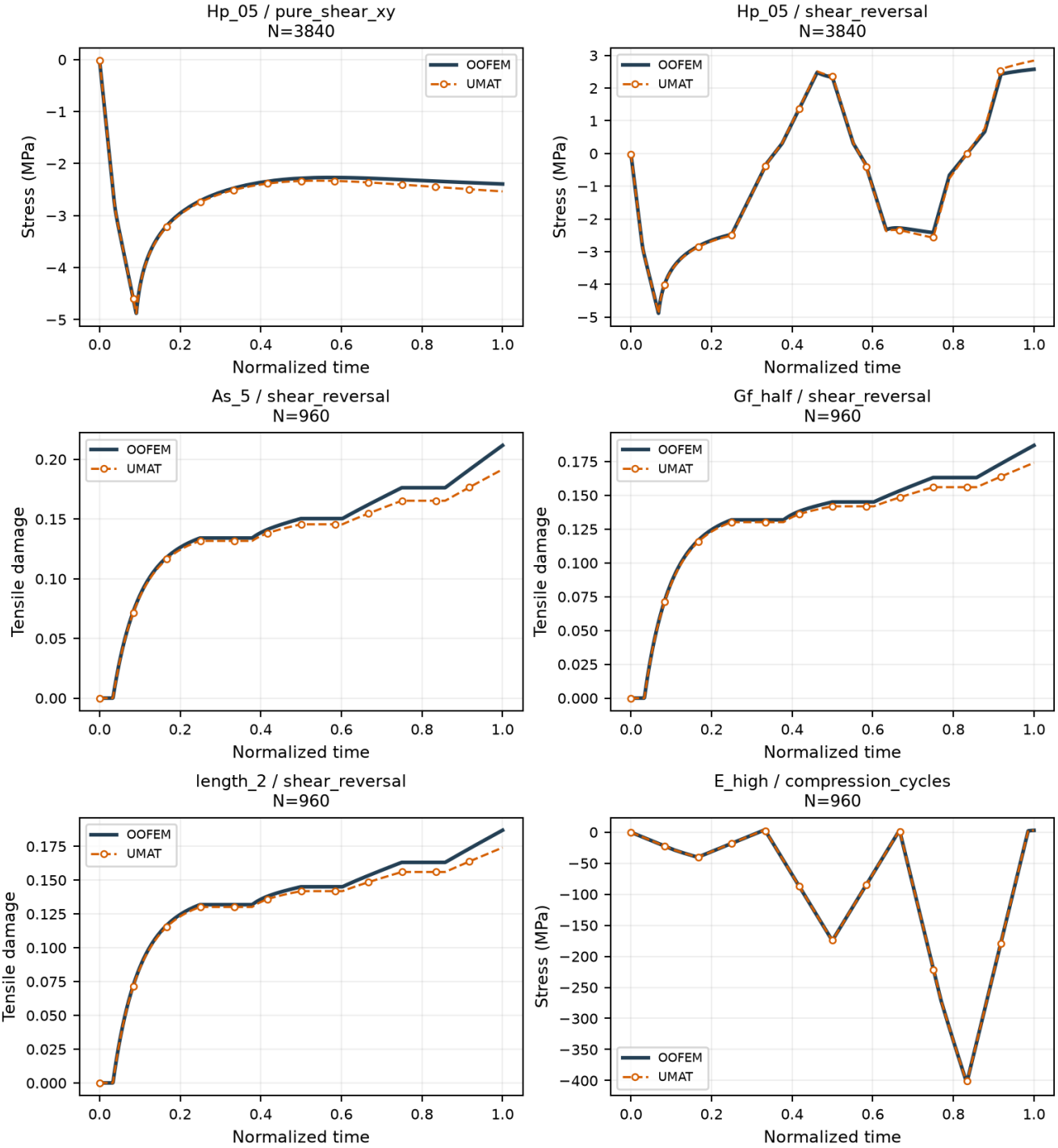
7 損傷履歴の比較



全比較の最大正規化応力差：0.0567288。引張・圧縮損傷の最大絶対差：0.0201305。各ケースの結果はresults.csvに収録しています。

追加試験の応答

未達条件の追加試験を示します。Nは増分数です。曲線が重なって見える場合も、全成分・損傷・積分点間の一様性を含む数値判定を適用しています。



8 せん断応答の差とノルムの定義

損傷履歴の塑性項に用いる増分の大きさを比較しました。工学せん断成分を$\gamma^{p}_{ij} = 2\varepsilon^{p}_{ij}$とすると、公開UMATはテンソルのFrobeniusノルムを使用します。一方、今回固定したOOFEM版の該当処理は、工学せん断を含む6成分配列に通常のEuclideanノルムを適用しています。

$$n_{tensor}^{2} = \Sigma_{i}(\Delta\varepsilon^{p}_{ii})^{2} + [(\Delta\gamma^{p}_{12})^{2} + (\Delta\gamma^{p}_{13})^{2} + (\Delta\gamma^{p}_{23})^{2}]/2$$

$$n_{vector}^{2} = \Sigma_{i}(\Delta\varepsilon^{p}_{ii})^{2} + [(\Delta\gamma^{p}_{12})^{2} + (\Delta\gamma^{p}_{13})^{2} + (\Delta\gamma^{p}_{23})^{2}]$$

差は降伏関数や材料定数の変更ではなく、損傷履歴に蓄積する塑性項の計算規約です。公開UMATの損傷ノルムと対応する微分のせん断重みだけを参照OOFEMに合わせた診断用コピーを作成し、同じ5条件で比較しました。材料入力・形状・特性長・載荷履歴・増分数・粘性1e-3・判定基準は変更していません。

条件	最大応力差 (%) 原版 / 診断用	損傷絶対差 原版 / 診断用
Hp_05 / pure_shear_xy N = 3840	2.922 / 0.003412	0.0037785 / 3.3577e-05
Hp_05 / shear_reversal N = 3840	5.4393 / 0.0040372	0.0043187 / 4.5288e-05
As_5 / shear_reversal N = 960	0.013527 / 0.0023184	0.020042 / 2.4108e-06
Gf_half / shear_reversal N = 960	0.0097554 / 0.0023184	0.012847 / 2.7889e-06
length_2 / shear_reversal N = 960	0.0097554 / 0.0023184	0.012847 / 2.7889e-06

診断用コピーでは5条件すべてが元の判定基準を満たしました。この5比較は原因を切り分けるための別枠の結果であり、公開UMATの342比較の集計には含めていません。元の5条件のFAILをPASSへ置き換えていません。

塑性硬化変数κ_{p}はほぼ一致し、粘性化前後の損傷差も残差より小さいことを確認しました。したがって、今回の差の主因は損傷ノルムの定義差と判断します。

8.1 座標表現を変えた独立確認

等方材料の応答は、同じ物理状態を別の座標で表すだけでは変わりません。純せん断のε^{p}_{12} = aを45度回転すると、主軸表現は(a, −a, 0)です。テンソルノルムの二乗はどちらも$2a^2$ですが、通常の6成分配列ノルムでは工学せん断表現が$4a^2$、主軸表現が$2a^2$となります。

元のOOFEMに対し、同じ主ひずみ履歴を主軸表現と45度回転表現で与え、応力を共通座標に戻して比較しました。H_p = 0.5、960増分、特性長√2 mm、載荷時間1000は共通です。特性長を明示的に一致させ、形状による長さの差を除外しています。

比較	最大正規化応力差
元OOFEM：主軸表現と45度回転表現	0.04141668 (4.1417%)
公開UMATの回転表現と元OOFEMの主軸表現	3.449417e-05 (0.0034494%)

この試験では、参照OOFEMの当該処理に座標表現依存性が現れています。せん断成分がない主軸表現のOOFEMと比較すると、変更していない公開UMATの応答はよく一致します。これは今回の固定版・当該経路についての確認であり、OOFEM全体や他の版に対する一般的な評価ではありません。

参照ソースの取り違えも確認しました。固定アーカイブの材料ソースは実行環境のソースとハッシュが一致し、その材料ソースを同じ設定で再コンパイル・再リンクした実行ファイルも、使用した参照実行ファイルとSHA-256が完全一致しました。

公開UMATのテンソルノルムは維持します。原版OOFEMとの比較差は定義差として明示し、診断用コピーの結果は独立して掲載します。この確認だけをもって、任意回転・任意履歴の客観性や、全条件での実装同等性を証明したとはしません。

9 再現方法と検証の範囲

入力生成：python generate.py
OOFEM：各ケースのディレクトリで oofem -f reference.in
Abaqus：材料条件ごとのディレクトリで test.inp を、src/cdpm2.f90を用いて実行
抽出：abaqus python extract.py〈材料条件ディレクトリ〉
比較：python analyze.py〈suiteディレクトリ〉

UMAT：公開ソースのSHA-256
78cc9a681a3526cd1d04e7232ada14ecb18cb116ecd4426b186029ef5536b2de

OOFEM：2.6、参照に使用した実行ファイルのSHA-256
2cc3f8abb5670bf65addf4ad301601ada8f57ed63a1721a88d7a5319d4e38780

OOFEMのconcretedpm2.CのSHA-256
fd3beb8fa510b41b191deb1f16e51ccea3b48009daec01716b1461746f511d13

参照ソースの固定コミットは1c1dbd2b4b8c95dcc26878bf5009d44ed535e1a6です。上記は実行環境のCRLF原本のハッシュです。公式GitHubの同コミットのLF原本と、改行正規化後のコードは一致します。LF原本のハッシュはprovenance.jsonに収録します。

比較は固定主軸の一様ひずみ経路、立方体の幾何学的特性長、上記の材料範囲と時間尺度に対して行っています。有限回転、自由側面の一軸応力、全体接線・収束性、時間刻み収束、任意形状の特性長、複数要素のメッシュ客観性、実験との適合性は本資料の判定範囲外です。

参考資料

Grassl et al. (2013), CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete. International Journal of Solids and Structures 50, 3805-3816.

OOFEM, ConcreteDPM2 implementation. https://github.com/oofem/oofem

Abaqus 2026 Verification Guide: User Subroutines / UMAT and UHYPER. SIMACAEVERRefMap/simaver-c-umatuhyper.htm.

Abaqus 2026 Output: Abaqus/Standard Output Variable Identifiers. SIMACAEOUTRefMap/simaout-c-stdoutputvar.htm.

Abaqus 2026 User Subroutines: UMAT / Storage of Stress and Strain Components. SIMACAESUBRefMap/simasub-c-umat.htm.

NAFEMS (2024), Guidelines for Validation of Engineering Simulations, R0134. Public overview and contents. https://www.nafems.org/publications/resource_center/r0134/

1. 312条件の回帰比較

基準版と配布版を同じ環境・材料・粘性・増分列で実行しました。基準ソースは下記ハッシュです。

78cc9a681a3526cd1d04e7232ada14ecb18cb116ecd4426b186029ef5536b2de

284条件は240増分、26条件は960増分、2条件は3840増分。18バッチ×2ソースの36解析は全て正常終了し、MSGエラー0でした。312条件の全保存時刻・全8積分点で時刻列と出力を比較しました。

比較量	最大絶対差
S	3.81149e-9 MPa
LE	2.97912e-57
SDV14	8.49859e-8
SDV37 / SDV38	1.92469e-10 / 7.59535e-11
SDV39	0
SDV59 / SDV60	1.92423e-10 / 7.58806e-11

応力差をmax(1 MPa,基準履歴最大応力)で除した最大値は3.37009e-11。この範囲で実質的な応答差は見られません。後付けの合否基準は設けず、比較状態はCOMPAREDです。

これはUMAT間の回帰比較です。OOFEMとの独立比較や、一般構造の全体Newton収束性の証明ではありません。

証拠：evidence/regression312_summary.json、evidence/regression312_comparison.json

2. 材料点・接線試験

試験	結果
例題2の保存失敗試行	91 / 91 局所収束
広い保存試行群	1094: 724 収束、370棄却
独立スペクトル試験	160 / 160; max relative error 3.1148e-15
接線幅掃引	700 / 724; 24 未達

接線の判定条件

摂動幅1e-5〜1e-12の指定15幅で、連続3幅の誤差が1e-4未満となることを判定します。同じ11幅の条件では685点です。幅集合が異なる結果を混ぜて改善率を評価しません。

固定幅1e-9の最大誤差は約0.832。摂動が主応力の符号境界を跨ぐ場合があり、全点・全幅で誤差が小さいわけではありません。試行947では摂動下の複数解保護による棄却があります。

再現範囲

保存試行の入力群は非公開で、上記の局所再生件数は内部保存証拠です。独立スペクトル試験は公開スクリプトで再現できます。局所収束は構造全体の解析完了とは異なります。

```
python tests/spectral_reference.py --compiler gfortran
```

スタブは単独試験用です。Abaqusへリンクせず、Abaqusの機能や並列安全性の検証に読み替えません。

3. 小規模有限要素試験

比較対象は直前の特性長接線候補であり、312条件の基準版とは異なります。各試験でS、LE、SDV、U、RFを全保存フレームから抽出しました。

試験	観測結果
C3D8：表面力指定	40増分・40反復、cutbackなし。保存値一致
C3D8：軸反転、混合境界	41増分、各1 cutback、反復47→46。最大応力差1.9001e-5 MPa
回転配置の2 C3D8：せん断反転	40増分・43反復、cutbackなし。保存値一致
2 C3D6：せん断	40増分・44反復、cutbackなし。保存値一致
直列／2スレッド指定・繰返し	保存値一致

これらの小規模検証入力はAs=15で、例題2のAs=5とは異なります。2スレッド指定の小規模試験は一般的な競合なしの証明やMPI検証ではありません。

実行の確認

個別の作業フォルダとソース／ライブラリハッシュを使用し、データチェック正常終了後に本解析を実行しています。配布入力の実行方法はマニュアルを参照してください。本資料の整理に伴う再解析は行っていません。

4. リスタートと適用限界

89状態変数の自動FIL形状読込みと同一ソースのリスタートは正常終了しました。再開時は元FILと外部形状表を使わず、リスタート／ODBファイルを引き継ぎました。22共通フレームを比較しています。

比較量	最大差
追加形状27値	0
S / material SDV	3.58e-13 / 3.56e-13
U	2.63e-18
RF：全22フレーム	5.666e-9
RF：開始後21フレーム	4.247e-15

開始フレームのRF差5.666e-9は当初の絶対差基準1e-9を超えます。原因は未確定で、全フレーム・全量一致試験は不合格のままです。以後の応答に差が持続しないことと、当初基準への合格は区別します。

証拠：evidence/FE_RESTART_RESULTS.json、evidence/RESTART_RF_AUDIT.json

確認していない範囲

実務での安全性、大規模・MPI、任意回転履歴とメッシュ、一般的な全体Newton収束性、実験的妥当性は保証しません。例題集の保存結果を、この配布ソースの再実行結果として扱いません。個々の用途で独立した確認が必要です。

資料の根拠：SIMULIA Abaqus 2026 > User Subroutines > UMAT（初期単要素試験、接線・状態変数）。SIMACAESUBRefMap/simasub-c-umat.htm。公式マニュアルは本実装を認証するものではありません。