

# SIMELM

STADAS , DYNES の要素試験シミュレーション

Version 2.24

May 2020

関東学院大学  
吉田 望



# 目 次

1	はじめに	1
2	データ入力	2
2.1	基本データ	2
2.2	構成則データ	3
2.3	単純せん断：応力振幅一定試験	4
2.3.1	実行停止に関するフラグ	4
2.3.2	初期応力	4
2.3.3	载荷条件	5
2.4	単純せん断：ひずみ制御試験	6
2.4.1	初期応力	6
2.4.2	载荷条件	6
2.5	三軸試験：軸差応力振幅一定試験	7
2.5.1	実行停止に関するフラグ	7
2.5.2	初期応力	7
2.5.3	载荷条件	8
2.6	任意制御	9
2.6.1	基本データ	9
2.6.2	载荷条件	9
2.7	任意制御（ひずみ制御）	11
2.7.1	基本データ	11
2.7.2	载荷条件	11
2.7.3	制御パラメータ	11
2.7.4	载荷値	12
3	プログラム改訂の歴史	13
4	メモ	14
4.1	三軸試験の制御	14



## 1 はじめに

このプログラムは、地盤と構造物 - 地盤系の汎用解析コード STADAS、およびその一次元バージョンである DYNES3D を使う際の、動的変形試験、液状化試験などをシミュレートするためのプログラムである。また、ひずみや応力の履歴を与えた要素試験のシミュレーションも可能である。これらの要素試験のシミュレーションは、STADAS を用いても行うことができるが、汎用プログラムで要素試験のシミュレーションプログラムを作るには、かなりのデータを用意する必要がある。SIMELM では条件を要素試験のシミュレーションに限定することによってデータ入力を簡単にしている。

各構成則の理論的な背景、構成則サブルーチンの構成などは、STADAS と DYNES のマニュアルに示されているので、このマニュアルでは示さない。

## 2 データ入力

プログラムは、次のような流れで構成される。

基本データの読み込み 2.1節

構成則パラメータの読み込み 2.2節

荷重の制御の読み込み 2.1節の設定に応じて、2.3、2.4、2.5節

ここで、の過程は何度でも繰り返される。すなわち、液状化判定と初期応力を同じにして、異なる応力振幅や異なるひずみ履歴を繰り返すことができる。2.3節では2.3.2項、2.4節では2.4.2項、2.5節では2.5.2項から以下の部分が繰り返される部分である。

### 2.1 基本データ

SIMELM では固体要素の単純せん断のシミュレーションを行う。

NCNST, IANA, MTFLG, LLSTOP, ATM, DSSTOP, ERRMAX (4I5, 3F10.0)

1 ~ 5 NCNST DYNES の構成則番号。下表参照。(STADAS と DYNES では、構成則の番号の入力方法が異なる。SIMelm では DYNES の番号を用いている)

一次元モデル		二次元モデル		三次元モデル	
No.	構成則	No.	構成則	No.	構成則
101	弾性	201	弾性	301	弾性
102	曲線型	202	修正飛田・吉田モデル	302	吉田モデル
103	折れ線型	203	飛田・吉田モデル	303	
104	吉田モデル	204	吉田モデル	304	
105	大ひずみモデル	205	弾性(拘束圧依存)	305	
106	-	206	二次元弾性	306	
107		207	体積ひずみモデル	307	
108		208		308	

6 ~ 10 IANA

載荷に関するフラグ

=0: 単純せん断: 応力振幅一定の液状化試験(非排水条件)

=1: 単純せん断: ひずみ制御(書式付き)

=2: 単純せん断: ひずみ制御(書式なし)

=3: 三軸試験: 応力振幅一定の液状化試験

=4: 任意の載荷

=5: 任意の載荷(ひずみ制御)

11 ~ 15 MTFLG

表形式で与えられる構成則の最大値の設定方法

=0: 接線剛性が連続するように双曲線モデルで外挿

=1: 完全塑性

=2: 割線剛性が一定

=3: 双曲線モデル( $G_{max}$ 不変)で外挿

16 ~ 20 LLSTOP

IANA=0, 3のとき有効で、このステップ数を越えると計算を終了する。例えば強度を超える除荷点を入力したときなど、永遠に計算が終わらなくなる可能性があるが、それを防止する目的で用いる。0であれば、この機能は働かない。

21 ~ 30 ATM

大気圧。収束判定に使われたり、拘束圧で使われていたりする。(default = 101.325tN/m<sup>2</sup>)

31 ~ 40 DSSTOP

IANA=0, 3のとき有効で、このひずみを越えると計算を終了する。例えば強度を超える除荷点を入力したときなど、永遠に計算が終わらなくなる可能性があるが、それを防止する目的で用いる。0であれば、0.2(20%)

に変更されるので、これ以上大きいひずみを対象としたい時には適当な値を入れる。

41 ~ 50 ERRMAX    イタレーション系の解析を使う場合 (IANA=3, 4) の時のみ有効で、収束の判定制御用に用いられる。誤差の応力のノルムが初期有効拘束圧の ERRMAX 倍で収束と判定。0であれば $10^{-6}$ に設定する。

## 2.2 構成則データ

この節の入力は、STADAS、DYNES と同じである。SIMelm は静的解析のプログラムであるが、DYNES と同じにしたことによって、全く計算に使用しない定数、例えば単位体積重量、透水係数、Rayleigh 減衰の定数なども入力データとして要求される。STADAS、DYNES のデータと全く同じデータが使えるようにとの配慮でこのようになっているわけであるが、計算に使わないデータについては特に入力する必要はない。ただし、印刷は行われる。

構成則には一次元解析用、二次元解析用、三次元解析用の構成則がある。一次元解析用の構成則は、全応力解析で、かつ地盤が水平方向の自由度を持っている場合のみ用いることが出来る。三次元解析用の構成則モデルはどのような場合にも用いることが出来る。二次元解析用の構成則には単純二次元と三次元平面ひずみ条件の構成則があり、いずれも二次元解析に用いることができる。

SIMELM では、多くの場合は等体積条件を指定し、せん断を加える、つまり、非排水条件を実現させている。この際、ダイラタンシーのある構成則では、過剰間隙水圧の発生は無いが、有効拘束圧は減少する。つまり、水の体積圧縮係数を無限大とした非排水条件、すなわち液状化試験のシミュレーションとなる。

入力については、STADAS、DYNES のどちらでも参照できるので、ここでは示さない。なお、STADAS では SIMelm では使わない構成則も含まれている。また、三次元の構成則は STADAS では記述されていない。したがって、DYNES を参照するのが良いと考えられる。

## 2.3 単純せん断：応力振幅一定試験

この節の入力は、IANA=0、すなわち、単純せん断状態で応力振幅一定の試験をするときのみ必要である。液状化試験と動的変形試験は同じである。

### 2.3.1 実行停止に関するフラグ

ほとんどの構成則では、液状化の明瞭な判定は行わないので、ユーザーは、解析結果を見ながら、液状化の判定を行う必要がある。このためには、かなり多くのステップの計算を行い、応力-ひずみ関係や応力経路を作図し、この結果から判断する必要がある。これは、作業としては結構大変な量となる。この作業を低減するため、よく用いられる液状化判定を用いて、プログラムを停止させる入力を可能としている。なお、この判定に当たらないときには、最後に示す、载荷条件の最後まで計算を行い、プログラムが停止する。

LIQJD, NFOLW, PWP, DAMP, SAMP, LIQSTS (2I5, 3F10.0, A20)	
1 ~ 5 LIQJD	プログラムを停止するためのフラグ =±1：過剰間隙水圧が初期有効拘束圧の PWP%になったとき。 =±2：両ひずみ振幅が DAMP%になったとき =±3：最大ひずみが SAMP%になったとき =±4：上記三つの判定のすべてが満たされたとき =±5：上記三つの判定のうち一つが満たされたとき ここで、値が正の時には判定が満たされた時に実行を停止する。負の時には、条件が満たされて後、NFOLW 半サイクルの载荷を行った後実行を停止する。
6 ~ 10 NFOLW	LIQJD<0のとき、プログラム停止フラグの条件が満たされて後、NFOLW 半サイクルの载荷を行って後プログラムの実行を停止する。(default=1)
11 ~ 20 PWP	液状化判定のための過剰間隙水圧発生量(%)。(default=95%)
21 ~ 30 DAMP	液状化判定のための両ひずみ振幅(%)。(default=7.5%)
31 ~ 40 SAMP	液状化判定のための最大ひずみ(%)。(default=3.75%)
41 ~ 60 LIQSTS	液状化判定時の状態のみを出力するファイル名。ブランクなら LIQSTS.out が用いられる。

### 2.3.2 初期応力

この項のデータがないか、ブランクが入力されると、プログラムは実行を停止する。なお、载荷では、x 方向が载荷方向（水平方向）、z 方向が鉛直方向で通常はこの2方向が必要である。ただし、二次元解析でも y 方向（加力と直交する方向）の直応力は存在するので、構成則によっては必要となる。

SIGX, SIGY, TAU, SIGZ (4F10.0)	
1 ~ 10 SIGX	$\sigma_x$
11 ~ 20 SIGY	$\sigma_z$
21 ~ 30 TAU	$\tau_{zx}$
31 ~ 40 SIGZ	$\sigma_y$ ：単純二次元の構成則では $\sigma_y=0$ と設定する。

(注) 一次元の構成則では、有効拘束圧と変形を計算するせん断変形は独立しているので、二、三次元のケースとは初期応力の意味が若干異なる。すなわち、側圧は载荷の間を通じて一定である。一次元の構成則では、側圧は必要でないように見えるが、有効拘束圧を計算するために必要である。ここで、 $\sigma_y$ は用いられず、 $\tau_{zx}$ は必ず0とする。プログラムではチェックはしてい

ない。プログラムでは、 $\sigma'_m = (\sigma'_z + 2\sigma'_x)/3$ より拘束圧を計算する。

(注) 二次元の構成則では、三次元の構成則で平面ひずみ状態を仮定したものと、単純二次元の構成則がある。両者で拘束圧の計算方法が異なるが、その制御を $\sigma_y$ で行っている。すなわち、 $\sigma_y=0$ であれば拘束圧は $\sigma'_m = (\sigma'_z + 2\sigma'_x)/3$ により計算し、 $\sigma_y \neq 0$ であれば $\sigma'_m = (\sigma'_z + \sigma'_x + \sigma'_y)/3$ により計算する。

### 2.3.3 载荷条件

この項のデータが無いときにはプログラムは実行を停止する。繰返し数に0が入力されると、入力の流れは2.3.2項に移る。これにより、初期条件を変えた計算が一連のデータで行えるようになる。この項の入力が終わると、入力の流れは再びこの項に戻る。したがって、载荷条件を変えた実験を何度も実行することが可能となる。

NCYC, TAUAMP, GAMINC, FILNAM	(I5, 5X, 2F10.0, A40)
------------------------------	-----------------------

1 ~ 5	NCYC	半サイクル数
11 ~ 20	TAUAMP	せん断応力振幅
21 ~ 30	GAMINC	ひずみ増分。(default 1E-5)。符号は最初に载荷する方向を表す。
31 ~ 70	FILNAM	結果を出力するファイル名。空白だと前と同じファイル名を用いる。最初に空白だと、SIMelm.outを用いる。

## 2.4 単純せん断：ひずみ制御試験

この節の入力は，IANA=1と2，すなわち，単純せん断状態でひずみ制御試験をするときのみ必要である。

### 2.4.1 初期応力

この項のデータがないか，ブランクが入力されると，プログラムは実行を停止する。

SIGX, SIGY, TAU, SIGZ (4F10.0)		
1 ~ 10	SIGX	$\sigma_x$
11 ~ 20	SIGY	$\sigma_y$
21 ~ 30	TAU	$\tau_{xy}$
31 ~ 40	SIGZ	$\sigma_z$ ：単純二次元の構成則では $\sigma_z=0$ と設定する。（2.3.2項の注参照）

### 2.4.2 载荷条件

NCYC, FILNAM, FILOUT, FMT (I5, 5X, 2A20, A30)		
1 ~ 5	NCYC	データ数で，10000以下のこと。負の時には別の意味（一定ひずみ振幅载荷）になり，次項参照
11 ~ 30	FILNAM	ひずみを入力するファイル名（NCYC<0の時には意味がない）
31 ~ 50	FILOUT	結果を出力するファイル名。
51 ~ 80	FMT	読み込むための書式（IANA=2の時は不要，NCYC<0の時には意味がない）

#### 2.4.2.1 载荷条件

この項の入力は，上記入力で NCYC<0の時のみ必要である。このとき，|NCYC| サイクルの载荷を行う。また，当然 FILNAM は意味がない。

NDIV, AMPSRN (I5, 5X, F10.0)		
1 ~ 5	NDIV	半サイクルの分割数。AMPSRN を NDIV で除したものが増分となる。
11 ~ 20	AMPSRN	ひずみ振幅（負号は最初に負側に载荷）

## 2.5 三軸試験：軸差応力振幅一定試験

この節の入力は，IANA=3，すなわち，非排水三軸繰返し試験で応力振幅一定の試験をするときのみ必要である。液状化試験と動的変形試験は同じである。

### 2.5.1 実行停止に関するフラグ

ほとんどの構成則では，液状化の明瞭な判定は行わないので，ユーザーは，解析結果を見ながら，液状化の判定を行う必要がある。このためには，かなり多くのステップの計算を行い，応力 - ひずみ関係や応力経路を作図し，この結果から判断する必要がある。これは，作業としては結構大変な量となる。この作業を低減するため，よく用いられる液状化判定を用いて，プログラムを停止させる入力を可能としている。なお，この判定に当たらないときには，最後に示す，载荷条件の最後まで計算を行い，プログラムが停止する。

LIQJD, NFOLW, PWP, DAMP, SAMP, LSTIF, LCNST, ITERMX		(2I5, 3F10.0, 3I5)
1 ~ 5	LIQJD	<p>プログラムを停止するためのフラグ</p> <p>=±1：過剰間隙水圧が初期有効拘束圧の PWP%になったとき。</p> <p>=±2：両ひずみ振幅が DAMP%になったとき</p> <p>=±3：最大ひずみが SAMP%になったとき</p> <p>=±4：上記三つの判定のすべてが満たされたとき</p> <p>=±5：上記三つの判定のうち一つが満たされたとき</p> <p>ここで，値が正の時には判定が満たされた時に実行を停止する。負の時には，液状化の条件が満たされて後，NFOLW 半サイクルの载荷を行った後実行を停止する。</p>
6 ~ 10	NFOLW	LIQJD<0のとき，プログラム停止フラグの条件が満たされて後，NFOLW 半サイクルの载荷を行って後プログラムの実行を停止する。( default=1 )
11 ~ 20	PWP	液状化判定のための過剰間隙水圧発生量(%)。( default=95% )
21 ~ 30	DAMP	液状化判定のための両ひずみ振幅(%)。( default=5% )
31 ~ 40	SAMP	液状化判定のための最大ひずみ(%)。( default=2.5% )
41 ~ 45	LSTIF	<p>非線形方程式の解き方に関するフラグ。原則として LSTIF=0とするが，接線剛性が求まらない構成則を使うときだけ，LSTIF=1とする。</p> <p>=0：接線剛性</p> <p>=1：初期剛性</p>
46 ~ 50	LCNST	<p>三次元の構成則を使うとき0，二次元の構成則を使うとき1とする。二次元の構成則では，<math>\sigma_y</math> は(計算されているときでも)使わない。したがって，二次元の構成則として登録されている三次元の構成則で平面ひずみを仮定しているケースは，この項の計算にはなじまない。これは，平面ひずみ条件と三軸試験が相反するものであることから理解できよう。</p>
51 ~ 55	ITEMX	イタレーションの最大回数。30程度の値が妥当。( default=100 )

### 2.5.2 初期応力

この項のデータがないか，ブランクが入力されると，プログラムは実行を停止する。

SIGZ, SIGX		(2F10.0)
1 ~ 10	SIGZ	軸方向応力
11 ~ 20	SIGX	側圧

### 2.5.3 载荷条件

この項のデータが無いときにはプログラムは実行を停止する。繰返し数に0が入力されると、入力の流れは2.5.2項に移る。これにより、初期条件を変えた計算が一連のデータで行えるようになる。この項の入力が終わると、入力の流れは再びこの項に戻る。したがって、载荷条件を変えた実験も何度も実行することが可能となる。

NCYC, TAUAMP, TAUINC, FILNAM		(I5, 5X, 2F10.0, A40)
1 ~ 5	NCYC	半サイクル数（ただし、液状化の判定を満たしたとき途中でも終了の可能性はある）
11 ~ 20	TAUAMP	軸差応力片振幅。ただし、負の場合には、絶対値は振幅で、さらに、次に入力する TAUINC は応力増分を TAUAMP/TAUINC にするという意味を示す。
21 ~ 30	TAUINC	応力増分。ただし、上に入力した TAUAMP が負の時には、応力増分を TAUINC 等分した値を応力増分とすることを意味する。また、TAUINC=0 であれば TAUAMP/20を応力増分とする。
31 ~ 70	FILNAM	結果を出力するファイル名。ブランクだと前と同じファイル名を用いる。最初にブランクだと、SIMelm.out を用いる。

## 2.6 任意制御

この節の入力は IANA=4, すなわち, 任意の制御が入力されたときのみ必要である。座標軸は  $z$  が鉛直,  $x$  が主な水平,  $y$  が場合によっては必要な  $x$  と直行する水平方向である。

### 2.6.1 基本データ

LSTIF, LCNST, ITERMX, SIGX0, SIGY0, SIGZ0, TAUZX0, TAUZY0		(3I5, 5X, 5F10.0)
1 ~ 5 LSTIF	非線形方程式の解き方に関するフラグ。原則として LSTIF=0とするが, 接線剛性が求まらない構成則を使うときだけ, LSTIF=1とする。 =0: 接線剛性 =1: 初期剛性	
6 ~ 10 LCNST	三次元の構成則を使うとき0, 二次元の構成則を使うとき1とする。二次元の構成則では, $\sigma_y$ は (計算されているときでも) 使わない。したがって, 二次元の構成則として登録されている三次元の構成則で平面ひずみを仮定しているケースは, この項の計算にはなじまない。これは, 平面ひずみ条件と三軸試験が相反するものであることから理解できよう。	
11 ~ 15 ITERMX	イタレーションの最大回数。30程度の値が妥当。(default=100)	
21 ~ 30 SIGX0	初期有効応力 $\sigma_{x0}$ 。一次元の構成則では不要。	
31 ~ 40 SIGY0	初期有効応力 $\sigma_{y0}$ 。一次元の構成則では不要。単純二次元用構成則では0とする(2.3.2項の注参照)。	
41 ~ 50 SIGZ0	初期有効応力 $\sigma_{z0}$	
51 ~ 60 TAUZX0	初期有効応力 $\tau_{zx0}$	
61 ~ 70 TAUZY0	初期有効応力 $\tau_{zy0}$ 。一次元の構成則では不要。単純二次元用構成則では不要。	

### 2.6.2 载荷条件

この項のデータが無いときにはプログラムは実行を停止する。繰返し数に0が入力されると, 入力の流れは2.6.2項に移る。これにより, 初期条件を変えた計算が一連のデータで行えるようになる。この項の入力が終わると, 入力の流れは再びこの項に戻る。したがって, 载荷条件を変えた実験も何度も実行することが可能となる。

NCYC, LXX, LYY, LZZ, LZX, LZY, FILNAM		(6I5, A40)
1 ~ 5 NCYC	除荷点の数	
6 ~ 10 LXX	xx 成分に関する载荷の制御方法 =0: $\varepsilon_{xx}$ を与える。 =1: $\sigma_{xx}$ を与える。	
11 ~ 15 LYY	yy 成分に関する载荷の制御方法 =0: $\varepsilon_{yy}$ を与える。 =1: $\sigma_{yy}$ を与える。	
16 ~ 20 LZZ	zz 成分に関する载荷の制御方法 =0: $\varepsilon_{zz}$ を与える。 =1: $\sigma_{zz}$ を与える。	
21 ~ 25 LZX	zx 成分に関する载荷の制御方法 =0: $\gamma_{zx}$ を与える。 =1: $\tau_{zx}$ を与える。	
26 ~ 30 LZY	zy 成分に関する载荷の制御方法	

=0 :  $\gamma_{zy}$  を与える。

=1 :  $\tau_{zy}$  を与える。

31 ~ 70 FILNAM      結果を出力するファイル名。空白だと前と同じファイル名を用いる。  
最初に空白だと、SIMelm.out を用いる。

### 2.6.3  载荷値

以下のカードは指定したファイルから読み込まれる。

NDIV, SX, SY, SZ, TAUZX, TAUZY	(I5, 5X, 5F10.0)
--------------------------------	------------------

1 ~ 5 NDIV	その区間の分割数
11 ~ 20 SX	$\epsilon_{xx}$
21 ~ 30 SY	$\epsilon_{yy}$
31 ~ 40 SZ	$\epsilon_{zz}$
41 ~ 50 TAUZY	$\gamma_{zx}$
51 ~ 60 TAUZY	$\gamma_{zy}$

## 2.7 任意制御（ひずみ制御）

この節の入力は IANA=5，すなわち，任意の制御が入力されたときのみ必要である。座標軸は  $z$  が鉛直， $x$  が主な水平， $y$  が場合によっては必要な  $x$  と直行する水平方向である。

### 2.7.1 基本データ

LCNST, SIGX0, SIGY0, SIGZ0, TAUZX0, TAUZY0			(I5, 5X, 5F10.0)
1 ~ 5	LCNST	三次元の構成則を使うとき3，二次元の構成則を使うとき2，一次元の構成則を使うときに1とする。	
11 ~ 20	SIGX0	初期有効応力 $\sigma_{x0}$ 。一次元の構成則では不要。	
21 ~ 30	SIGY0	初期有効応力 $\sigma_{y0}$ 。一次元の構成則では不要。単純二次元用構成則では不要。	
31 ~ 40	SIGZ0	初期有効応力 $\sigma_{z0}$	
41 ~ 50	TAUZX0	初期有効応力 $\tau_{zx0}$	
51 ~ 60	TAUZY0	初期有効応力 $\tau_{zy0}$ 。一次元の構成則では不要。単純二次元用構成則では0とする（2.3.2項の注参照）。	

### 2.7.2 載荷条件

この項のデータが無いときにはプログラムは実行を停止する。繰返し数に0が入力されると，入力の流れは2.6.2項に移る。これにより，初期条件を変えた計算が一連のデータで行えるようになる。この項の入力が終わると，入力の流れは再びこの項に戻る。したがって，載荷条件を変えた実験も何度も実行することが可能となる。

NCYC, NDIV, FILIN, FILOUT, FMT			(2I5, 2A20, A30)
1 ~ 5	NCYC	点の数	
6 ~ 10	NDIV	$=0$ : 2.7.4項で読み込むデータをそのまま入力とする最も普通の使い方。 $>0$ : 2.7.4項で読み込むデータ間を NDIV 分割して計算する。 $=-1$ : 2.7.4項で読み込むデータのうち相当ひずみの増分が2.7.3項で入力するひずみの値より大きいときは，増分がこれより小さくなるようにひずみ増分を調整する。	
11 ~ 30	FILIN	2.7.3節で載荷値を入力するファイル名。ブランクの時は2.7.4項のデータは2.7.3項のデータに続けて入力する。	
31 ~ 50	FILNAM	結果を出力するファイル名。ブランクだと前と同じファイル名を用いる。最初にブランクだと，SIMelm.out を用いる。	
31 ~ 80	FMT	ひずみを読み込む FORMAT。次項に示す5つのひずみを一度に読み込める様な形式とする。両端を必ず括弧でくくること。なお，ブランクとすると，書式無しファイルから読み込む（この場合，データは倍精度）。ただし，FILIN がブランクの時には(8F10.0)となる。	

### 2.7.3 制御パラメータ

この項の入力は，NDIV=-1の時のみ必要である。

EEMIN			(F10.0)
1 ~ 10	EEMIN	NDIV=-1の時にのみ使われ，最大の相当ひずみ増分。次項の入力で得られる相当ひずみ増分がこの値より大きければ，増分値がこの値以下になるように増分を等分する。	

#### 2.7.4 载荷値

以下のカードは指定したファイルから読み込まれる。

##### (1) 1次元の構成則

EPS	FMT
1 ~ 10 EPS	ばねの相対変位

##### (2) 二次元の構成則

EX, EZ, GAMZX	FMT
1 ~ 10 EX	$\epsilon_{xx}$
21 ~ 30 EZ	$\epsilon_{zz}$
31 ~ 40 GAMZX	$\gamma_{zx}$

##### (2) 三次元の構成則

EX, EY, EZ, GAMZX, GAMZY	FMT
1 ~ 10 EX	$\epsilon_{xx}$
11 ~ 20 EY	$\epsilon_{yy}$
21 ~ 30 EZ	$\epsilon_{zz}$
31 ~ 40 GAMZX	$\gamma_{zx}$
41 ~ 50 GAMZY	$\gamma_{zy}$

### 3 プログラム改訂の歴史

1999.7	1.0	Original version
2000.5	2.0	DYNES の三次元化に伴い，三次元の扱いを行う。 ひずみ制御だけではなく，応力制御も可能にする。
2001.12	2.1	吉田モデルの構成則の共通化
2004.1	2.21	任意制御
2004.12	2.22	ZZ4040を改訂。負の応力の扱い
2009.1	2.23	ZZZ004の安田・山口の式の適用範囲 0.07 0.007
2010.11	2.24	拡張 R-O モデルの追加

## 4 メモ

### 4.1 三軸試験の制御

側方に広がって良い。これを考えると、CSTTUTを修正する必要がある。というのは、一次元の解析と異なるから。構成則は三次元でないといけない。二次元の構成則では、三軸試験の代わりに二軸試験が可能であろう。

CSTTUTでは、原則的にはDYNESのCSTTUTを使っている。しかし、上記のことを考えると、そのままでは使えない。DYNESでは剛性マトリックスは3×3である。しかし、一般的な三軸状態を考えると、5×5にはしておく必要がある（ $\tau_{xy}$ は不要）。その配列を次のようにする。

$$\sigma = \{\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{zx} \quad \tau_{zy}\}^T \quad (4.1)$$

すると、応力 - ひずみ関係は次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} = [k] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} \quad \text{または増分形式で表して} \quad \begin{Bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\sigma_z \end{Bmatrix} = [k] \begin{Bmatrix} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_y \\ d\varepsilon_z \end{Bmatrix} \quad (4.2)$$

三軸試験であるので、非排水条件、 $x, y$  は挙動が同じを前提として考える。

非排水条件と対称条件を考えると、次の二つの式が成立する。

$$\begin{aligned} \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z &= 0 \\ \varepsilon_x &= \varepsilon_y \end{aligned} \quad (4.3)$$

したがって、 $\varepsilon_z$ を独立変数とすると、次の関係が成立する。

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = -\varepsilon_z / 2 \quad (4.4)$$

式(4.4)を式(4.2)に代入し書き下す。 $x, y$  方向は挙動が同じなので、 $x$  方向のみを書くことにする。

$$\begin{aligned} (-0.5k_{xx} - 0.5k_{xy} + k_{xz})\varepsilon_z &= \sigma_x \\ (-0.5k_{zx} - 0.5k_{zy} + k_{zz})\varepsilon_z &= \sigma_z \end{aligned} \quad (4.5)$$

三軸試験では、軸差応力で制御する。軸差応力は次のように表される。

$$\sigma_z - \sigma_x = (k_{zz} - k_{xz} - 0.5k_{zx} - 0.5k_{zy} + 0.5k_{xx} + 0.5k_{xy})\varepsilon_z \quad (4.6)$$

これを参考にすると解析手順は次のようになる。

軸差応力を入力として与え、式(4.6)より対応するひずみ増分を求める。

構成則サブルーチンに代入し、ひずみ増分に対する増分応力を求める。

設定した軸差応力から得られた軸差応力を引いたものが不釣り合い力である。不釣り合い力が小さければ、収束である。もし、収束していなければ、設定した軸差応力に不釣り合い力を加える。これを式(4.6)のとし、にもどる。

二次元の構成則に対しては、上記の式は、次のようになる。

非排水条件を考えると、次の式が成立する。

$$\varepsilon_x + \varepsilon_z = 0 \quad (4.7)$$

したがって、 $\varepsilon_z$ を独立変数とすると、次の関係が成立する。

$$\varepsilon_x = -\varepsilon_z \quad (4.8)$$

式(4.4)を式(4.2)に代入し書き下す。

$$\begin{aligned} (-k_{xx} + k_{xz})\varepsilon_z &= \sigma_x \\ (-k_{zx} + k_{zz})\varepsilon_z &= \sigma_z \end{aligned} \quad (4.9)$$

軸差応力は次のように表される。

$$\sigma_z - \sigma_x = (k_{zz} - k_{xz} - k_{zx} + k_{xx})\varepsilon_z \quad (4.10)$$