

mfai.exe

目 次

ユーザズ・マニュアル.....	1
-----------------	---

1. はじめに.....	1
1.1 動作環境.....	1
1.2 インストールとアンインストール.....	1
2. 操 作（簡易版）.....	2
2.1 断面要素の作成.....	2
2.2 軸方向要素の作成.....	2
2.3 計算の開始、中断・再開および終了.....	2
2.4 計算の詳細設定.....	3
3. 内 容.....	4
3.1 適用範囲.....	4
(a) 断面要素.....	4
(b) 軸方向要素.....	6
(c) 計算結果の有効性.....	6
(d) 計算上の仮定.....	6
3.2 計算フロー.....	7
(a) 初期状態.....	7
(b) 載荷前の計算.....	7
1) Solid、BarおよびPreTendonのIntroduction Strainによる軸力のStrainへの変換.....	7
2) PosTendonのIntroduction Strainによる軸力のStrainへの変換.....	7
3) ExternalのStrainへの変換.....	8
4) 載荷前の計算の結果.....	8
5) 載荷前の計算の順序.....	8
(c) 載荷の計算.....	9
1) Moment–Curvature関係の計算.....	9
2) Load–Displacement関係の計算.....	9
3.3 補足.....	9
(a) 断面要素のSolidからの差引きについて.....	9
1) 内部重複の場合.....	10
2) 境界重複の場合.....	10
(b) 各段階のStrain分布について.....	11
(c) 曲率の加算について.....	12
(d) 計算上の中立軸位置およびSolidのStrainが 0 となる位置について.....	13

(e) 収束計算について	14
(f) 収束判定について	15
(g) 抵抗曲げモーメントの計算における中心の取り方について	17
(h) 計算上の中立軸位置に関わる断面位置の取り方について	17
(i) 図心軸に関する断面 2 次モーメントについて	18
(j) 弾性荷重法について	18
(k) 曲げモーメントから曲率を求める方法について	19
4. 操 作	21
4.1 断面要素の作成	21
4.2 断面要素および軸方向要素の編集	22
(a) Solid、Bar、PreTendon、PosTendon、External	22
(b) Beam	25
4.3 Stress-Strain ファイルの作成	26
4.4 計算の詳細設定	26
(a) Calculation	26
1) Curvature Range1 ~ Range3 およびツールバーのStep	26
2) Convergence	26
3) Section Parameter	27
(b) Output1、Output2	27
(c) Chart/Figure	27
(d) SS Curve	28
(e) Messages	28
(f) Misc	28
1) Window State	28
2) Window Arrange	29
4.5 入力ファイルの与え方	29
4.6 計算の開始、中断・再開および終了	29
(a) 主たる計算の計算の開始、中断・再開および終了	30
1) 断面要素について	30
2) 軸方向要素について	30
(b) 断面諸量の計算の実行	31
4.7 その他の操作	31
5. 出 力	33
5.1 Chart および Figure	33
(a) Moment と Curvature、Load と Displacement	34
1) Moment および Load	34
2) Curvature および Displacement	36
(b) Chart-Moment-Curvature	36
(c) Chart-Load-Displacement	36
(d) Chart-Stress Total と Chart-Stress Loading 等	37

(e) Chart—Moment、Chart—Load	37
(f) Chart—Curvature、Chart—Displacement	37
(g) Chart—Convergence Func	37
1) 載荷前の計算	37
2) 載荷の計算	38
5.2 Table	38
(a) Table—Solver	38
(b) Table—Section.....	38
1) 断面要素の単体での断面諸量	39
2) 3 種類の計算方法の違い	39
1: Before	40
2: After	41
3: Skimp	42
3) 仮想断面のヤング係数への換算の意味	42
4) 断面諸量の説明と計算式	43
5) 断面諸量の用途	46
(c) Table—Solid、Table—Bar、Table—PreTendon、Table—PosTendon、Table—External	47
5.3 File.....	47
(a) File—Solver	47
5.4 Tool Bar	48
(a) Step	48
5.5 Status Bar	48
(a) Beam Top、Beam Bottom、Beam Height	48
(b) Calculation、Status	48
(c) Iteration	49
(d) Iteration Max.....	49
(e) Diff1、Diff2.....	49
(f) Moment—Total Max.	50

添付サンプルの実行例 51

1. SAMPLE.INPの読み込み.....	52
-------------------------	----

ADD OBJECT WIZARDの実行例 53

1. SOLIDの作成	54
-------------------	----

ユーザース・マニュアル

1. はじめに

1.1 動作環境

- Microsoft Windows 2000/XP 上で動作します。その他、以前の OS でも、基本的に動作すると思われます。
- 計算中にリアルタイムに画面表示する Output の数にもよりますが、速度面から、Pentium 4 程度以上が必要です。

1.2 インストールとアンインストール

setup.exeを実行してインストールしてください。アンインストールは、コントロールパネルにある「アプリケーションの追加と削除」を実行し、かつ、インストールフォルダ(C:\Program Files\Mfaiなど)を削除してください。

- 一般に、アドミニストレータとしてログインしてインストール、アンインストールを実行します。
- アンインストールでは、インストールフォルダが削除されず残されます。これは、そのフォルダすなわち mfai.exeが存在するフォルダに、インストール時以降にmfai.exeが自動的に作成した以下の3つのシステムファイルが存在するからです。これらは、不要な場合はいずれも削除できます。

表 1 システムファイル

ファイル名	ファイルの種類	ファイルの内容・説明
mfai.ini	設定ファイル	4.4 に示す計算の詳細設定が保存されています。
mfai.inp	空の入力ファイル	最初の立上げ時に自動的に作成されます。断面要素や軸方向要素が何も無い状態で保存しても作成できます。
mfai.log	記録ファイル	計算中の経過時間やメッセージなど、計算の記録が保存されています。

これら以外については、ユーザーが作成した必要な入力ファイルでないかどうかを確認のうえ、削除してください。

なお、Help—AboutのCleanタブでOKを押せば、上記の3つのシステムファイルを削除してmfai.exeが終了します。

- アンインストールでは、拡張子がOCXのファイルを消してよいかどうか聞いてくる場合もあります。その場合は、一般にそれらは他のプログラムの動作には不要ですので、すべて削除してください。
- mfai.exe自身はレジストリに変更を加えません。そのかわりに、インストールフォルダにINIファイル(mfai.ini)を作成します。

2. 操 作 (簡易版)

以下では、一通りの使い方を記します。詳細な操作については 4. を参照して下さい。

まず、mfai.exe を立ち上げます。その後、

2.1 断面要素の作成

Object—Solid とし、Solid のグリッドを表示した状態で、Object—Add Solid として Solid 断面を作成。できあがったら、

- Solid のグリッドのどこかの行の上で Object—Chart として、応力—ひずみモデルを確認。
- Solid のグリッドを表示した状態で Object—Figure として、断面形状を確認。

Object—Bar とし、Bar のグリッドを表示した状態で、Object—Add Bar として Bar を配置。できあがったら、

- Bar のグリッドのどこかの行の上で Object—Chart として、応力—ひずみモデルを確認。
- Bar のグリッドを表示した状態で Object—Figure として、断面配置を確認。

PreTendon、PosTendon または External についても、必要に応じて、同様に配置、確認。

2.2 軸方向要素の作成

Object—Beam とし、Beam を作成。できあがったら、

- Beam のグリッドを表示した状態で Object—Figure として、側面形状を確認。

2.3 計算の開始、中断・再開および終了

File—Start で計算開始。計算中、

- 自動で Pause がかかったら、Table—Solver のハイライト個所を見てその意味を確認しつつ、再度 File—Start で計算開始。

自動の Pause を繰り返しながらも計算を続けていると、最終的には Tool—Option の Calculation タブの Curvature Range3 の To に示す最大の曲率増分で計算は終了します。その前に、

- 手動で計算を終了したい場合は、File—End。
- 手動で計算を Pause したい場合は、File—Pause。

また、最大の曲率増分に至る前に、何らかのエラーで終了することもあります。エラーが出るのは、

- 収束しなくなった。
- 完全にちぎれてしまった。

といった意味のある状態のほか、もちろん、プログラムのバグもないとは言い切れません。

2.4 計算の詳細設定

そのほか、計算中、表示が煩雑に感じたら、

- それが計算の進行が遅いためなら、ツールバーにある曲率増分をいつでも変更。
- それが自動の Pause のためなら、File—End で一旦計算を終了し、Tool—Option の Messages タブで Pause のチェックを適宜設定したうえで、再度 File—Start で計算開始。
- それが表示の煩雑さのためなら、File—End で一旦計算を終了し、Tool—Option の Output タブで出力する Chart、Figure、File、Table を適宜設定したうえで、再度 File—Start で計算開始。

3. 内 容

3.1 適用範囲

このマニュアルはmfai.exeの特性を詳細に記述できてはおりません。また、mfai.exeは完全なエラー処理ができていないと思いますし、あり得ない数値をチェックなしで受け付けてしまうこともあります。そういう意味での誤った使用による誤った計算結果の出力を防ぐため、使用にあたっては他の方法による計算結果とのすり合わせを行うことが望まれます。

mfai.exeでは、

- 軸力と曲げを受ける断面の、Moment–Curvature 関係のファイバー法による解析
- 単純ばりに対して対称 2 点載荷、およびその特別な場合として中央 1 点載荷を行う場合について、Moment–Curvature 関係の解析結果を用いた自重を考慮した Load–Displacement 関係の弾性荷重法による解析

を同時進行で行うことができます。以下に詳細な適用条件等を示します。

(a) 断面要素

使用可能な断面要素の種類と特徴は、表 2 に示す通りです。Moment–Curvature 関係の計算では、内部では一定の Stress と Strain となる断面要素の集まりとして、断面がモデル化できる必要があります。

全ての断面要素は、基本的にはほとんど同等なのですが、表 2 および表 3 に示す相違点のように、少しずつ異なっているため、別の種類としています。

表 2 断面要素の種類と特徴

種類	必須	正	形状		応力・ひずみ	Introduction Strain		位置の影響		想定対象
			形状	断面積		設定	効果	高さ	左右	
Solid	○	圧縮	矩形	有	有	可	Introduction Strain を減少	有	無	コンクリート
Bar	—	引張	円・異形	有	有	可	Introduction Strain を減少	有	無	鉄筋
PreTendon	—	引張	円	有	有	可	Introduction Strain を減少	有	無	プレテンション PC 鋼材
PosTendon	—	引張	円	有	有	可	Introduction Strain は無変化	有	無	ポストテンション PC 鋼材

External	Axial Force	—	圧縮	点	無	無	不可	(無変化)	有	無	軸力
	Bending Moment	—	正たわみ方向	(点)	無	無	不可	(無変化)	無	無	曲げモーメント

入力時に考慮する正の方向を意味します。Solid、Bar、PreTendon および PosTendon については、それら自身の応力やひずみに関する正の方向です。一方、External については、断面に力あるいはモーメントを与えるものとする場合の正の方向です。したがって、例えば PosTendon の「引張」は断面に圧縮力を与えますから、PosTendon の「引張」と Axial Force の「圧縮」は同じ方向であり、内部の処理では同じ方向として取り扱われています。

表 3 断面要素の相違点

断面要素		相違点
Solid	Bar	- 正をどちらに取るか。 - 断面形状が矩形か円・異形か。
Bar	PreTendon	断面形状に異形が選択できるかどうか。
PreTendon	PosTendon	自身の Introduction Stress により自身の Introduction Strain を減少させるかどうか。
PosTendon	External (Axial Force)	- 正をどちらに取るか。 - 断面かどうか。
External (Axial Force)	External (Bending Moment)	軸力があるかどうか。

入力時のみ。内部の処理では正の方向は同じ。

このように基本的にはほとんど同等なのですが、Solid は必須としています。Solid 以外の断面要素については、必須はなく、任意に存在することができます。

- Solid が必須である主たる理由は、断面諸元の計算を行うときに、他の断面要素の断面積を、ヤング係数の比である換算率、例えば E_s/E_c で換算するための分母として用いなければならないことです。mfai.exe では断面諸元の計算はおまけの機能なので、中心的な機能であるファイバー法による断面計算においては、必須の断面要素はないということになります。
- Solid は、必須であること以外にも、他の断面要素とは異なる大きな特徴があります。それは、他の断面要素が Solid 上に配されている場合、Solid はこれらの断面要素の断面積を排除した断面であると考えする必要はなく、Solid の断面積は自動的に差し引かれることです。

断面要素のその他の特徴は以下の通りです。

- 全ての断面要素は、Introduction Strain を持つことができます。また、その値により応力—ひずみ関係に応じた Introduction Stress を発生します。
- 全ての断面要素は、Introduction Strain を除くと、平面が保持され、すなわち完全に付着します。アンボ

ンド構造や外ケーブル構造には適用できません。

- 全ての断面要素は、どこに配置してもよいのですが、Solid 以外の断面要素が Solid 上に配されていないと Warning を出します。また、ファイバー法ですので左右の位置は計算結果に影響を与えません。さらに、External のうちの Bending Moment の高さの位置には意味がなく、計算結果にも影響を与えません。
- PosTendon はポストテンション PC 鋼材を想定したのですが、Solid 上への配置のために実際は用いられるグラウトを想定した断面要素はありません。ダクトの大きさは PosTendon とちょうど同じであるとし、さらに、PosTendon は Solid と完全付着するものとしします。

(b) 軸方向要素

Load-Displacement 関係の計算では、軸方向に同一断面としてモデル化できる必要があります。

Beam は必須としています。

- 断面計算そのもの、すなわち Moment-Curvature 関係の計算においては、Beam はもちろん必要ありません。しかし、Beam の数が 0 で、その結果せん断スパンが 0 と見なされると、曲げモーメントから荷重を求めることができません。逆に言うと、せん断スパンが 0 の部材では、どんな大きさの荷重が作用しても曲げモーメントは発生しません。いわば、高さ方向に圧縮されている状態となります。このため、Load-Displacement 関係が計算できません。これが、Beam が必須である主たる理由です。
- 軸方向要素は、断面要素の集まりとして自重 w (例えば単位は N/mm) を発生します。 w は軸直角方向の活荷重 P と同じ方向に作用するもので、対象構造をはり(水平部材)と考える場合には意味がありますが、柱(鉛直部材)と考える場合では、その軸力となるわけではありません。

(c) 計算結果の有効性

Moment-Curvature 関係は収束しなくなるまで、Load-Displacement 関係は最大荷重までが有効な計算結果となります。

- ある曲げモーメントから荷重を求めることは容易です。しかし、そのときの変位の計算に必要な、その曲げモーメントに対応する曲率の分布は、最大荷重以降で曲げモーメントが減少するときなどでは、一意的に定めるのは困難です。これが、Load-Displacement 関係では最大荷重までが有効な計算結果となる理由です。

(d) 計算上の仮定

表 4 の仮定を用いています。ファイバー法や弾性荷重法の仮定や手法、 $P-\delta$ 効果の詳細については他の資料も参照してください。

表 4 計算上の仮定

項 目	仮 定
断面要素 の特性	いずれの断面要素も、曲げ剛性(EI)は 0 と仮定します。ただし、断面諸元の計算を行うときは、考慮します。
平面保持	断面要素がそれぞれ完全付着しており、軸力と曲げモーメントによる Strain 増分が深さ方向に直線的に変化する、いわゆる断面の平面保持を仮定します。
$P-\delta$ 効果	External の大きさおよび深さすなわち偏心は変化せず、変位にかかわらず一定の軸力と曲げモーメントを発生するものと仮定します。すなわち、 $P-\delta$ 効果は考慮できません。

3.2 計算フロー

(a) 初期段階

断面要素に Introduction Strain を与えます。この段階が初期段階であり、各断面要素は、対称断面要素となるときに、この Introduction Strain を有した状態で付着すると考えます。

- 初期段階では曲率は 0 です。また、断面の軸力と曲げモーメントは釣合っていません。

(b) 載荷前の計算

1) Solid、Bar および PreTendon の Introduction Strain による軸力の Strain への変換

この段階では、断面要素のうち Solid、Bar および PreTendon を対象とし、Introduction Strain によるそれらの軸力を外力と見て、断面の軸力と曲げモーメントの釣合いを収束計算します。すなわち、Introduction Strain が与えられている状態からの、

表 5 載荷前の計算—段階 1

段階 1-1	Solid、Bar および PreTendon の軸力の合計が釣合う上縁 Strain 増分(1-1)、すなわち、弾性理論でいう P/EA を収束計算します。	収束計算 (1-1)
段階 1-2	Solid、Bar および PreTendon の軸力による曲げモーメントが釣合う上縁 Strain 増分(1-2)、すなわち、弾性理論でいう $-M/EZ'$ と、計算上の中立軸位置(1)を、軸力の合計が釣合う条件のもとで収束計算します。	収束計算 (1-2)

これらの計算により得られる 2 種類の上縁 Strain 増分と計算上の中立軸位置(1)により、各断面要素の Strain 増分が求められます。すなわち、この計算により、外力を内力=各断面要素の Strain 増分に変換したことになります。

Strain 増分は Introduction Strain に加えられ、外力による軸力と曲げモーメントが釣合う状態になります。さらに、上縁 Strain 増分(1-2)と計算上の中立軸位置(1)を用いて、曲率増分(1)が得られます。

- P/EA と $-M/EZ'$ を別々に収束計算するのは、計算上の中立軸位置(1)が必ず断面高さ内にあるようにし、減算における誤差を防ぐとともに、収束アルゴリズムが確実に動作するようにするためです。2)、3) も同様です。
- Solid、Bar および PreTendon は、外力であると同時に自身も対象断面要素となります。すなわち、自身の軸力による断面要素の変形により、自身の Introduction Strain を減少させます。
- Solid、Bar および PreTendon は、それぞれコンクリート、鉄筋およびプレテンション PC 鋼材を想定対象としているため、最初から一体化していると考えています。よって、この 3 種類は同時に釣合いを計算します。

2) PosTendon の Introduction Strain による軸力の Strain への変換

この段階では、断面要素のうち Solid、Bar、PreTendon を対象とし、Introduction Strain による PosTendon の軸力を外力と見て、断面の軸力と曲げモーメントの釣合いを収束計算します。すなわち、1) の状態からの、

表 6 載荷前の計算—段階 2

段階	PosTendon の軸力の合計が釣合う上縁 Strain 増分(2-1)、すなわち、弾性理論でいう	収束計算
----	--	------

2-1	P/EA を収束計算します。	(2-1)
段階 2-2	PosTendon の軸力による曲げモーメントが釣合う上縁 Strain 増分(2-2)、すなわち、弾性理論でいう $-M/EZ'$ と、計算上の中立軸位置(2)を、軸力の合計が釣合う条件のもとで収束計算します。	収束計算 (2-2)

これらの計算により得られる 2 種類の上縁 Strain 増分と計算上の中立軸位置(2)により、各断面要素の Strain 増分が求められます。すなわち、この計算により、外力を内力=各断面要素の Strain 増分に変換したことになります。

Strain 増分は 1) の後の Strain に加えられ、外力による軸力と曲げモーメントが釣合う状態になります。さらに、上縁 Strain 増分(2-2)と計算上の中立軸位置(2)を用いて、曲率増分(2)が得られます。

- PosTendon は、外力ではありますが自身は対象断面要素ではありません。すなわち、自身の軸力により断面要素が変形しても、自身の Introduction Strain は減少しません。

3) External の Strain への変換

この段階では、断面要素のうち Solid、Bar、PreTendon および PosTendon を対象とし、External = 外力による、断面の軸力と曲げモーメントの釣合いを収束計算します。すなわち、2) の状態からの、

表 7 載荷前の計算—段階 3

段階 3-1	External の Axial Force の合計が釣合う上縁 Strain 増分(3-1)、すなわち、弾性理論でいう P/EA を収束計算します。	収束計算 (3-1)
段階 3-2	External の Axial Force による曲げモーメントおよび Bending Moment の合計が釣合う上縁 Strain 増分(3-2)、すなわち、弾性理論でいう $-M/EZ'$ と、計算上の中立軸位置(3)を、軸力の合計が釣合う条件のもとで収束計算します。	収束計算 (3-2)

これらの計算により得られる 2 種類の上縁 Strain 増分と計算上の中立軸位置(3)により、各断面要素の Strain 増分が求められます。すなわち、この計算により、外力を内力=各断面要素の Strain 増分に変換したことになります。

Strain 増分は 2) の後の Strain に加えられ、外力による軸力と曲げモーメントが釣合う状態になります。さらに、上縁 Strain 増分(3-2)と計算上の中立軸位置(3)を用いて、曲率増分(3)が得られます。

- External は、外力であり、もちろん、自身は対象断面要素ではありません。

4) 載荷前の計算の結果

以上の 1) 、2) および 3) の 3 段階の載荷前の計算により、Strain 増分は Introduction Strain に順次加算され、各断面要素の載荷前の Strain、すなわち Strain-PreLoading が得られます。

また、曲率増分(1)、(2)および(3)を加算して、載荷前の曲率 Curvature-PreLoading を求めておきます。

5) 載荷前の計算の順序

以上の 3 段階の載荷前の計算の順序を入れ替えると、一般に結果が異なってきます。それぞれの想定対象を念

頭に、1)、2)、3)の順番に、それぞれの段階で、一旦釣合いが取られるものと判断しました。

(c) 載荷の計算

1) Moment–Curvature 関係の計算

この段階では、すべての断面要素を対象とし、0 から始まる曲率増分を所定のピッチで与えることで、それぞれの曲率増分における断面の軸力の釣合いを収束計算します。すなわち、(b) 3) の状態から、

表 8 載荷の計算—Moment–Curvature 関係

段階 4-1	所定の曲率増分(4)を与え、軸力が釣合うように、計算上の中立軸位置(4)を収束計算します。そして、そのときに発生している曲げモーメント M を求めます。 さらに、与えた曲率増分(4)と求めた計算上の中立軸位置(4)を用いれば、Strain 増分分布(4)が得られます。	収束計算 (4)
段階 4-2	曲率増分(4)を、載荷前の曲率、すなわち曲率増分(1)、(2)、(3)の和に加えて、曲率 ϕ を求めます。	

この収束計算(4)が、ファイバー法における中心的な計算内容です。Introduction Strain が 0 の断面では、収束計算(4)しか行われません。すなわち、載荷前の計算における収束計算では、最初から軸力と曲げモーメントがそれぞれ 0 で釣合っているの、素通りします。

2) Load–Displacement 関係の計算

Displacement は、弾性荷重法により求めています。

表 9 載荷の計算—Load–Displacement 関係

段階 4-3	1) で求めた M は、スパン中央の値であるとし、 M が自重 w による曲げモーメント $M_{Dead} = wl^2/8$ より小さい場合は、M は M_{Dead} 以下の等分布荷重 $w' (< w)$ によるものとし、活荷重 P は 0 となります。 - 大きい場合は、$M_{Live} = M - M_{Dead}$ が P によるものとし、$P = 2M_{Live}/a$ となります。	
段階 4-4	- まず、M の軸方向分布を、$M_{Total} = M_{Live} + M_{Dead}$、$M_{Dead}$ および M_{Live} について求めます。M_{Live} は台形分布、M_{Dead} は 2 次関数分布とします。 - 次に、それぞれの軸方向要素に作用する M に対応する曲率 ϕ を、計算時点までの Moment–Curvature 関係から検索し、曲率分布を求めます。曲率分布を共役ばりに載荷したときの各軸方向要素の位置の曲げモーメントを計算し、その位置の変位とします。	

- 中央 1 点載荷の場合は、もちろん M_{Live} は三角形分布になります。

3.3 補足

(a) 断面要素の Solid からの差引きについて

Bar、PreTendon あるいは PosTendon が Solid 上に配されている場合、それらの断面積は Solid から差し引かれます。その方法は以下の通りです。差し引きの結果、Solid の断面積が負値になることもあります。

1) 内部重複の場合

断面要素の Depth と Left が、ある Solid の内部にある場合、その Solid の Area を差し引きます。以下のいずれのケースでもこの方法が適用されます。

- 断面要素が、その Solid に完全に含まれている場合(1-a)
- 断面要素が、その Solid からみ出している場合(1-b)
- 断面要素が、その Solid より大きい場合(1-c)

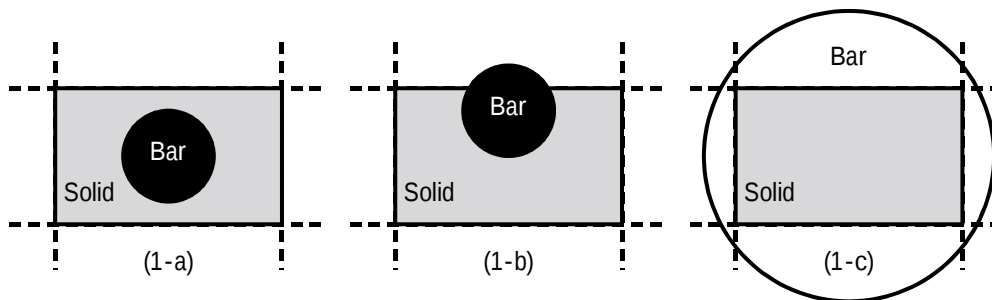


図 1 断面要素の Solid からの差し引き(内部重複)

2) 境界重複の場合

断面要素の Depth と Left が、ある Solid の境界にある場合、その Solid を含む 1 つ以上の Solid の境界に配されたことになりますので、それらすべての Solid から均等に Area を差し引きます。

- 1 つの Solid の断面積を差し引く場合(2-a)...関連する Solid が最も少ない場合
- 4 つの Solid の断面積を差し引く場合(2-b)...関連する Solid が最も多い場合

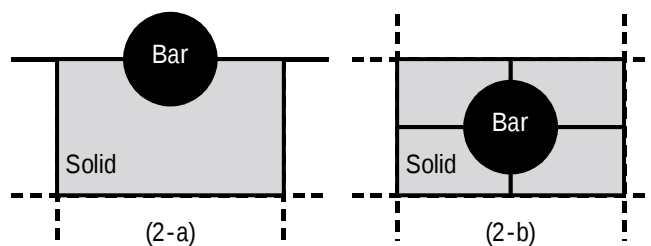


図 2 断面要素の Solid からの差し引き(境界重複)

以上の内部重複と境界重複は、同じ手順により差し引き処理されています。すなわち、Solid の Number が 2 以上の場合と Solid が重複している場合も合わせて考え、

- まず、関連する Solid の数で、差し引く断面積を除する。
- さらに、それぞれの Solid から差し引く断面積を、それぞれの Solid の Number で割る。

により得られる断面積を、個々の Solid から差し引いています。

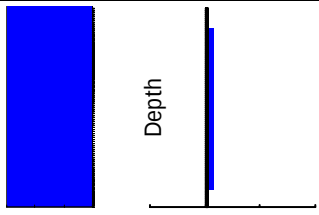
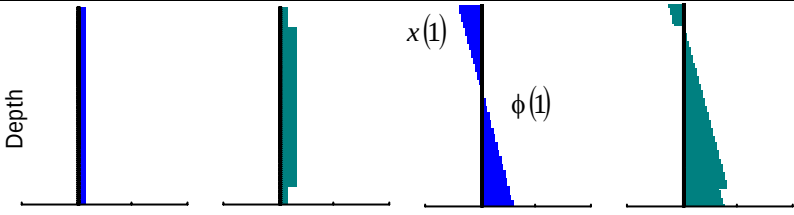
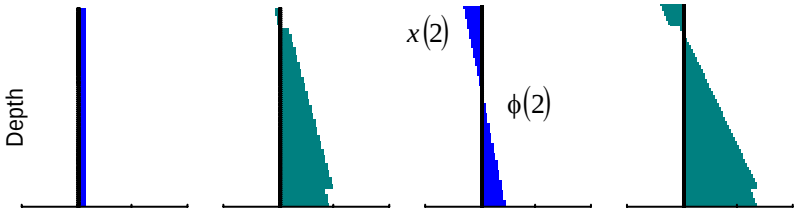
関連する Solid の数は、境界重複については 2) の通り 4 つが最多となりますが、Solid が重複している場合を考えると、Solid の Number が 1 であっても無限に大きくなる可能性があります。

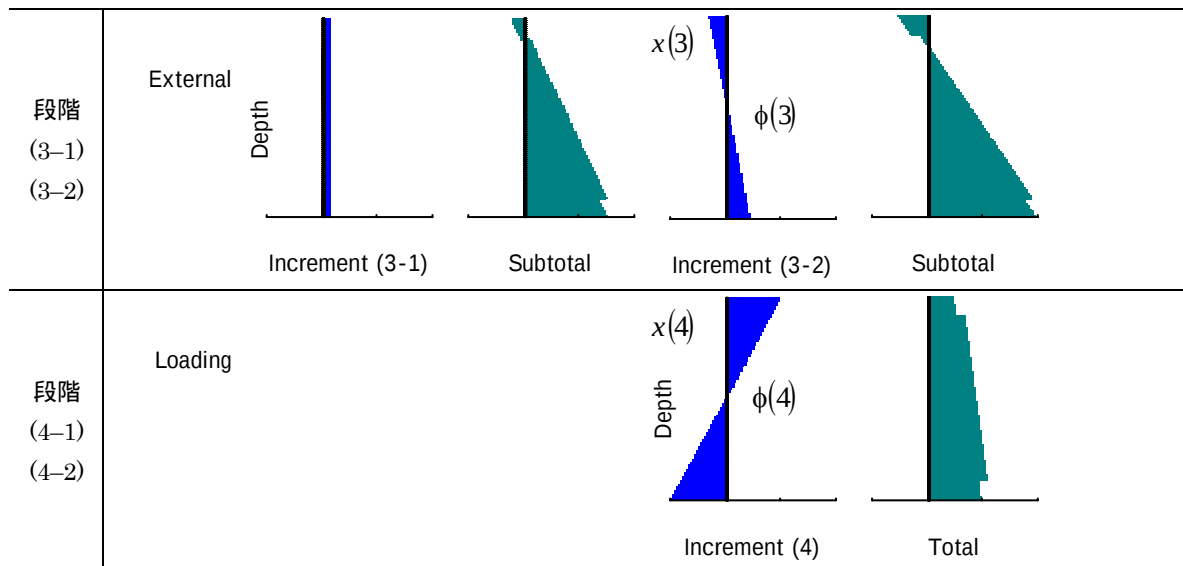
なお、幅や高さ、あるいは両方が 0 で、すなわち断面積が 0 の Solid と重複している場合は、これは実際の状況を考えると「重複していない」状態なのであり、断面要素は単独で存在しているわけですから、そのような寸法の Solid からは、例外的に断面積を差し引きません。よって、例外的に、断面積は負値となりません。

- Add Solid における Extreme 機能では、高さが 0 の縁端 Solid を自動的に作成します。詳細は 4.2 (a) を参照。
- この縁端 Solid 以外でも、縁端 Solid と同じ意味で、Stress や Strain を求めたい位置に、幅や高さ、あるいは両方が 0 の断面要素を配置することが、計算を行ううえでのテクニックと考えられます。よって、意図的に寸法を 0 とすることが考えられます。
- この例外を設ける理由は、差し引き後の Solid の断面 2 次モーメントの計算をうまく行えるようにすることです。詳細は 5.2 (b) 2) を参照。

(b) 各段階の Strain 分布について

表 10 各段階の Strain 分布

初期 段階	 Depth x: Neutral Axis Depth Calc ϕ: Curvature Introduction
段階 (1-1) (1-2)	Solid Bar PreTendon  Depth Increment (1-1) Subtotal Increment (1-2) Subtotal $x(1)$ $\phi(1)$
段階 (2-1) (2-2)	PosTendon  Depth Increment (2-1) Subtotal Increment (2-2) Subtotal $x(2)$ $\phi(2)$



(c) 曲率の加算について

mfai.exeでは、3 段階の載荷前の計算により得られる曲率増分(1)、(2)、(3)、および、載荷の計算により得られる曲率増分(4)を加算して、最終的な曲率としています。

各段階の Strain 増分を加算して次の段階への Strain 分布を求めており、それぞれの Strain 増分の分布には平面保持が仮定されているので、各段階の曲率増分が加算できるというのは当たり前といえば当たり前のようにも感じられます。あえて数式で表すと、以下のようになります。

2 つの外力を考えます。まず、それぞれの外力により上縁 Strain 増分 ε_{cu1} および ε_{cu2} が発生し、Strain 増分に対する計算上の中立軸位置が x_1 および x_2 、深さ d における Strain 増分が ε_1 および ε_2 になったとします。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= -\varepsilon_{cu1} \frac{d - x_1}{x_1} \\ \varepsilon_2 &= -\varepsilon_{cu2} \frac{d - x_2}{x_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

一方、2 つの外力の合計により中立軸位置が x になるとすると、上縁および深さ d における Strain 増分を加算することにより、 x には以下のような関係式があります。

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = -(\varepsilon_{cu1} + \varepsilon_{cu2}) \frac{d - x}{x} \dots\dots\dots (2)$$

(1)、(2)式より、

$$-\left(\varepsilon_{cu1} \frac{d - x_1}{x_1} + \varepsilon_{cu2} \frac{d - x_2}{x_2} \right) = -(\varepsilon_{cu1} + \varepsilon_{cu2}) \frac{d - x}{x} \dots\dots\dots (3)$$

これより d が消去でき、

$$X = \frac{\frac{\varepsilon_{cu1} + \varepsilon_{cu2}}{\frac{\varepsilon_{cu1}}{X_1} + \frac{\varepsilon_{cu2}}{X_2}}}{\dots} \dots \dots (4)$$

2 つの外力による曲率増分をそれぞれ ϕ_1 、 ϕ_2 とすると、 $\phi_1 = \frac{\varepsilon_{cu1}}{X_1}$ 、 $\phi_2 = \frac{\varepsilon_{cu2}}{X_2}$ であるから、2 つの外力の合計による曲率 ϕ は以下のように表されます。

$$\phi_1 + \phi_2 = \frac{\varepsilon_{cu1} + \varepsilon_{cu2}}{X} = \phi \dots \dots \dots (5)$$

これは、曲率増分が加算できることを示していると言えるでしょう。

(d) 計算上の中立軸位置および Solid の Strain が 0 となる位置について

計算上の中立軸位置は、3 段階の載荷前の計算および載荷の計算の計 4 段階において、それぞれの段階の曲率増分に応じた Strain 増分が発生しない位置を意味しています。Strain そのものが発生しない位置という意味ではありません。すなわち、計算上の中立軸位置での Strain の絶対値は 0 ではなく、その結果、コンクリート部材に曲げひび割れがある場合のその先端付近を表すものでもありません。

- 計算上の中立軸位置は、内部的には、基準となる座標軸(X 軸)からの深さ方向の距離として取り扱っています。すなわち、上縁の位置が 0 でない場合は、上縁の位置を加算した状態で計算に用いています。ただし、Table—Solver での表示は、上縁の位置からの深さ方向の距離を表示しています。

一方、載荷の計算では、計算上の中立軸位置に加え、Solid の Strain の断面分布に基づき、Solid の Strain が 0 となる位置(のうち最も下縁側)を検索しています。こちらは、コンクリート部材の場合はほぼ曲げひび割れの上端付近を表します。

- Solid の Strain が 0 となる位置は、Solid の Strain の断面分布において 0 となる位置が上縁と下縁の間にある場合はその位置を、ない場合は Solid の Grid において最上行と最下行の Solid の Strain から幾何学的に計算しています。うまく計算できているかどうかは、Chart—Strain Total を見て判断できます。

これらの位置は、計算途中でどうしても計算できなくなる瞬間があります。その瞬間および対処方法について表 11 に示します。mfai.exeでは、減算による誤差を防ぐとともに、収束アルゴリズムが確実に動作するようにするため計算上の中立軸位置を用いて計算を行っています。

表 11 計算上の中立軸位置および Solid の Strain が 0 となる位置の計算の可否

	状況	計算上の中立軸位置 (Neutral Axis Depth Calc)	Solid の Strain が 0 となる位置 (Neutral Axis Depth Zero)
載荷前の 計算	曲率増分 = 0 (各段階の計算の最初)	Strain 増分がすべて 0 のため 計算不可能 ↓ 対象断面の図心位置(y')	(計算していない)

	曲率増分 > 0	計算可能 断面高さ内にあるため Object の Depth との減算で 誤差を生じにくい	
載荷の 計算	曲率増分 = 0 (計算の最初)	Strain 増分がすべて 0 のため 計算不可能 ↓ 対象断面の図心位置 (y')	Solid の Strain が上下対称の場合、 計算不可能 ↓ 対象断面の図心位置 (y')
	曲率増分 > 0	計算可能 断面高さ内にあるため Object の Depth との減算で 誤差を生じにくい	Solid の Strain が上下対称の場合、 計算不可能 ↓ 対象断面の図心位置 (y')

「↓」が対処方法として与える数値。

例えば断面の下方に偏心している圧縮軸力がある場合、載荷の計算の初期には Solid の Strain が 0 となる位置は断面の上方にあり、載荷の進行に伴いどんどん上方に移動します。その後、Solid の Strain の断面分布の傾きが負から正に転換する瞬間で、Solid の Strain が上下対称となり、傾きが ∞ になることから Solid の Strain が 0 となる位置が定められず、計算不可能です。さらにその後は、Solid の Strain が 0 となる位置は断面の遙か上方から遙か下方に不連続に移動します。

ただし、実際の計算では、曲率増分(4)の Step の取り方や計算の誤差もあることから、Solid の Strain が上下対称になるのは、かなり運が悪いといえます。

(e) 収束計算について

収束計算(1-1)～(4)では、いずれもニュートン法を用いています。

- たとえば、収束計算(4)では、収束関数 $f(x) \equiv N^+ - N^- = 0$ 、すなわち軸力が釣り合う($C - T = 0$)ように、計算上の中立軸位置 x を変数として、ニュートン法を用いています。

収束計算(1-1)と(1-2)、(2-1)と(2-2)、(3-1)と(3-2)はそれぞれペアになっており、対象とする断面要素が異なりますが、収束計算の方法は同じです。

ニュートン法を用いるには、ある変数の値に対し、関数の微分係数 $df(x)/dx$ すなわち傾きを求める必要があります。しかし、これらの収束計算では、微分係数を表す関数を定式化するのは非常に困難です。

- たとえば、収束計算(4)では、 $f(x)$ は断面要素の Stress-Strain モデルや Stress-Strain ファイルに依存しています。これらは、複雑な場合分けがなされているモデルであったり、あるいはファイルを用いる場合はそもそも定式化されたものではないため、 $f(x)$ の陽な表現すら困難であり、ましてや $df(x)/dx$ の陽な表現は非常に困難です。

そこで、mfai.exeでは、図 3 に示すように、現在の変数値 x_i を前後にわずかに変化させて 2 点の関数値を求め、それらの点間の傾きとして、 x_i に対する微分係数を求めています。すなわち、

$$\left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_i} = \frac{f(x_i + x_i \times \text{Diff. Width}) - f(x_i - x_i \times \text{Diff. Width})}{(x_i + x_i \times \text{Diff. Width}) - (x_i - x_i \times \text{Diff. Width})} \dots\dots\dots (6)$$

これを用いて、より正解に近い次の変数値 x_{i+1} を、以下のようにして求めています。

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{\left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_i}} \dots\dots\dots (7)$$

以上の計算では、 x_i および $x_i \pm x_i \times \text{Diff. Width}$ の 3 つの変数により同じ関数 f を 3 回計算しているのであり、1 回で済ませる方法に比べれば、当然、3 倍の時間を要しています。ただ、収束がほぼ確実に到達できること、収束が早期に到達できること、コーディングがスマートであることから、mfai.exe ではニュートン法を採用しています。

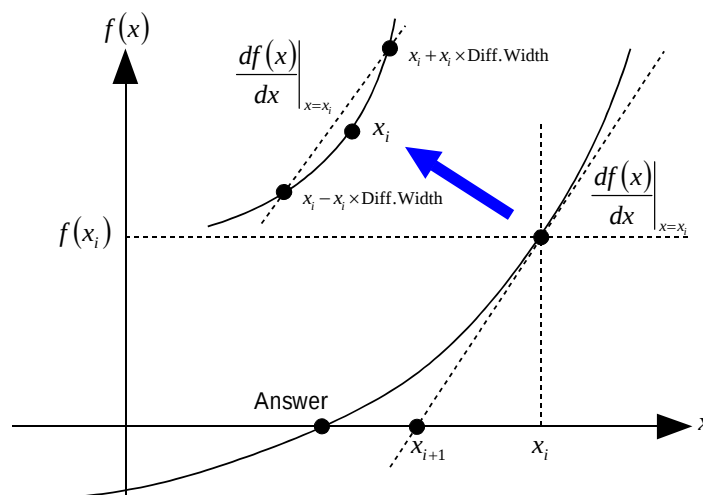


図 3 Diff. Width を用いたニュートン法

ところで、前後への振幅の大きさの割合である Diff. Width によっては、関数値が急変したりジャンプしたりするところで正しい微分係数が計算されなくなります。このような最悪の場合を想定し、Tool—Option の Calculation で Diff. Width を設定できるようにしてあります。また、Diff. Width が小さすぎると $x \pm x \times \text{Diff. Width}$ で誤差が生じてしまうこともあります。

- 図 3 は、mfai.exe の収束計算における $f(x)$ が実際にこのような形状の関数であるという意味ではなく、一般的な図を示したものです。
- 収束関数の形状は、Chart—Convergence Func により確認することができます。

(f) 収束判定について

各収束計算では、それぞれ以下の表中の式が成立したときに収束したと判定されます。

- n は収束精度を表すパラメータで、 $1/10^n$ の整数値。Tool—Optoin の Precision で設定可能であり、デフォルトでは 3 としています。

- 載荷前の計算における収束判定では、収束誤差が載荷の計算に影響しないように、載荷の計算における判定よりも $1/10^3$ だけ精度を高めています。

収束計算(1-2)、(2-2)および(3-2)では、 $N^+ - N^- = 0$ と $M^+ - M^- = 0$ に対して順番に収束計算が行われるのではなく、 $N^+ - N^- = 0$ を収束させたうえで $M^+ - M^- = 0$ を収束させるという、2 重の収束計算が行われます。

表 12 収束関数、変数および収束判定

処理		対象 断面要素	収束 計算	収束関数 $f(x)$	変数 x	収束判定(Diff1<Diff2)	
						Diff1	Diff2
初期 段階	Initial	Solid Bar PreTendon PosTendon	—	—	—	—	—
載 荷 前 の 計 算	Solid Bar PreTendon	Solid Bar PreTendon	(1-1)	$N^+ - N^- = 0$ ($C - T = 0$)	上縁の Strain 増分(1-1)	abs ($N^+ - N^-$)	min (N^+, N^-) $\times 1/10^{n+3}$
					計算上の 中立軸位置(1)		
			(1-2)	$M^+ - M^- = 0$ ($M = 0$)	上縁の Strain 増分(1-2)	abs ($M^+ - M^-$)	min (M^+, M^-) $\times 1/10^{n+3}$
	PosTendon	Solid Bar PreTendon	(2-1)	$N^+ - N^- = 0$ ($C - T = 0$)	上縁の Strain 増分(2-1)	abs ($N^+ - N^-$)	min (N^+, N^-) $\times 1/10^{n+3}$
					計算上の 中立軸位置(2)		
			(2-2)	$M^+ - M^- = 0$ ($M = 0$)	上縁の Strain 増分(2-2)	abs ($M^+ - M^-$)	min (M^+, M^-) $\times 1/10^{n+3}$
	External	Solid Bar PreTendon PosTendon	(3-1)	$N^+ - N^- = 0$ ($C - T = 0$)	上縁の Strain 増分(3-1)	abs ($N^+ - N^-$)	min (N^+, N^-) $\times 1/10^{n+3}$
					計算上の 中立軸位置(3)		
			(3-2)	$M^+ - M^- = 0$ ($M = 0$)	上縁の Strain 増分(3-2)	abs ($M^+ - M^-$)	min (M^+, M^-) $\times 1/10^{n+3}$
載 荷 の 計 算	Loading	Solid Bar PreTendon PosTendon	(4)	$N^+ - N^- = 0$ ($C - T = 0$)	計算上の 中立軸位置(4)	abs ($N^+ - N^-$)	min (N^+, N^-) $\times 1/10^{n+3}$

N^+ および N^- 、 M^+ および M^- は、いずれも正値。また、 abs は絶対値を与える関数、 min は小さい方を与える関数。

(g) 抵抗曲げモーメントの計算における中心の取り方について

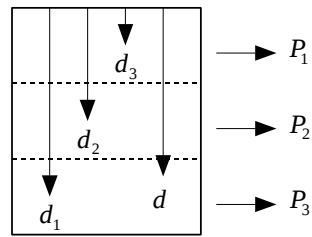


図 4 抵抗曲げモーメントの中心

軸力が釣合っている断面の抵抗曲げモーメント M の計算を行うにあたり、上縁を M の中心と考えると、

$$M_{\text{上縁}} = P_1 d_1 + P_2 d_2 + P_3 d_3 = \sum_i P_i d_i \dots\dots\dots (8)$$

上縁から d の位置を中心と考えると、

$$M_d = P_1(d_1 - d) + P_2(d_2 - d) + P_3(d_3 - d) = \sum_i P_i(d_i - d) = \sum_i P_i d_i - d \sum_i P_i \dots\dots\dots (9)$$

断面の軸力が釣合っていることから $\sum_i P_i = 0$ なので、結局、 $M_{\text{上縁}} = M_d$ となります。すなわち、 M の計算においては、理論上はどの場所を中心としてもよいことが確認できます。

しかし、アーム長 $d_i - d$ の計算は減算であり、計算機の特長として d_i と d のオーダーが大きく異なると誤差が無視できなくなるため、 M_d の計算結果は異なるようになります。このことから、中心とする場所 d は、すべての d_i とさほど異ならないよう、断面高さ内のどこかの位置とすることが考えられます。

- 誤差は、例えば $1-10^{-16}$ の計算を 8 桁しか記憶できない処理系で行うと、前後の項の間のオーダーの差が非常に大きいため、計算結果は $\underbrace{1.0000000}_{8\text{桁}}$ または $\underbrace{0.99999999}_{8\text{桁}}$ のいずれかになってしまうことです。これらの計算結果はいずれも正しくなく、前者では差し引きが無視されたことになり、後者では過剰に(およそ 10^8 倍もの値が)差し引かれたことになります。

種々の d を用いて M_d を求めた例では、プログラム言語の有効桁数の範囲内で、傾きは正・負ともありうるものの、両者はほぼ線形関係にあるという結果が得られています。ただし、断面要素の種々の条件や载荷の条件下で常に最適となる d についての情報は得られていません。

断面高さ内において中心とする場所としては、特別な点として、上縁、下縁あるいは中立軸位置などが考えられます。mfai.exeでは、これらのうち計算上の中立軸位置 x を中心としています。

(h) 計算上の中立軸位置に関わる断面位置の取り方について

想定した X 軸と断面位置の関係については、通常、上縁が X 軸上にあるようにすることが考えられます。

しかし、上下対象断面では、図心位置が X 軸上にあるようにすることもあり得ます。その場合、計算上の中立

軸位置 x は図心位置すなわち X 軸上となり、 x は 0 に非常に近くごく小さな値となります。そして、 x を M の計算における中心としているmfai.exeでは、アーム長 $d_i - x$ (d_i には上縁位置も含む)の計算において、 d_i と x のオーダーが大きく異なることになるため、誤差が発生します。

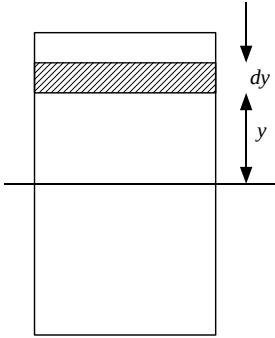
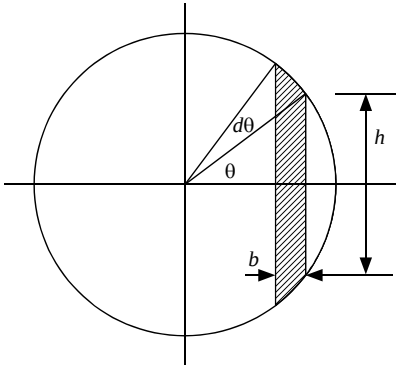
この誤差は、(e) に示したニュートン法による収束計算において、変数を計算上の中立軸位置 x としている場合に、 $d_i - (x \pm x \times \text{Diff.Width}) \cong d_i - x$ と計算されてしまう原因となります。その場合、 $df(x)/dx \cong 0$ となりますから、式(7)がエラーとなり、収束しません。

このことから、mfai.exeでは、 x がはり高さに比して非常に小さい場合は、断面位置を別の位置にするよう警告を出すようにしています。

(i) 図心軸に関する断面 2 次モーメントについて

矩形断面(Solid)と円断面(Bar、PreTendon および PosTendon)の断面 2 次モーメントは、いずれも計算方法を知るといよりは計算結果を覚えるべきものですが、ここでは計算方法を示しておきます。

表 13 図心軸に関する断面 2 次モーメント

矩形断面	円断面
$I = \int_A y^2 dA = \int_{-h/2}^{h/2} y^2 b dy = \frac{bh^3}{12}$	$b = r \cos \theta - r \cos(\theta + d\theta) \cong r \sin \theta \cdot d\theta \quad (\because d\theta \ll 1)$ $h = 2r \sin \theta$ $\Delta I = \frac{bh^3}{12} = \frac{2}{3} r^4 \sin^4 \theta \cdot d\theta$ (dA を矩形と考えます) $I = \int \Delta I = \int_0^\pi \frac{2}{3} r^2 \sin^4 \theta \cdot d\theta = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi D^4}{64}$
	

(j) 弾性荷重法について

曲率分布 ϕ_x をひっくり返して共役^{きょうやく}ばりに载荷(= 弾性荷重を载荷)したときに、その曲げモーメント分布 M_x が、もとのはりのたわみ分布 v_x になるというモールの定理を用いた、たわみ曲線の解法です。

- 添え字 x は、軸方向の座標を意味します。本書の他の個所では、添え字 x を省略していることもあります。なお、内部的には、中央を原点とし支点に向かう座標軸を使用しています。
- 共役ばりのせん断力分布 Q_x は、もとのはりのたわみ角分布 θ_x になります。

- mfai.exeが対象としている単純ばり(単純支持ばり)の共役ばりは、単純ばりになります。つまり、境界(支持)の条件が同じです。

断面力については、分布荷重 q_x が載荷されたときの M_x や Q_x を求めます(表 14 で $\rightarrow \rightarrow$)。たわみ曲線については、(q_x による) M_x が載荷されたときのたわみ分布 v_x やたわみ角分布 θ_x を求めます(表 14 で $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow$)。断面力の釣合い式と弾性たわみ曲線式がよく似ていることから、これらの計算はよく似たものとなります。

- 分布荷重 q_x は、集中荷重 P_x とも読み替えられます。 P を P_x として扱う方法については、式(10)を参照してください。

表 14 断面力の釣合い式と弾性たわみ曲線式の関係

	断面力の釣合い式	弾性たわみ曲線式
求める解	$M_x, Q_x \left(= \frac{dM_x}{dx} \right)$	$v_x, \theta_x \left(= \frac{dv_x}{dx} \right)$
基礎式	$\frac{d^2 M_x}{dx^2} = -q_x$	$\frac{d^2 v_x}{dx^2} = -\frac{M_x}{EI} (= -\phi_x)$
与える条件	q_x	$\frac{M_x}{EI} (= \phi_x)$: 弾性荷重 = 曲率
		M_x
		q_x

一方、断面力については、図形による視覚的な解法を用いることができます。すなわち、 $\rightarrow$ を解くことなく、 $\rightarrow$ と求めることができます。そこで、たわみ曲線についても、同様に図形による視覚的な解法を用いることが考えられます。この視覚的な方法においては、基礎式の類似性から、 $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow$ のうちの $\rightarrow \rightarrow$ の代わりに、共役ばりにおいて $\rightarrow$ の手順をたどります。もともと、 $\rightarrow$ はもとのはりにおける $\rightarrow$ ですから、 $\rightarrow$ をもとのはりとは共役ばりについて各 1 回の計 2 回、すなわち断面力についての図形による視覚的な解法を計 2 回行うことにより、たわみ曲線を求めるわけです。これを言葉で短く書くと、本節冒頭の記述となります。

- 「ひっくり返して載荷する」のは、一般に正の曲率が図形上では下方向に描かれるのに対し、それを正の弾性荷重として載荷するわけですから、図形上では「ひっくり返す」ことになる、という意味です。つまり、正負が反転するというのではなく、正負が同じという意味です。

なお、変断面ばりでも、曲げ剛性 EI を $(EI)_x$ と考えるだけで適用できます。例えば、鉄筋コンクリートのよう、コンクリートのひび割れ発生により軸方向に EI が変化する場合でも、弾性荷重法は適用できます。

(k) 曲げモーメントから曲率を求める方法について

弾性荷重法においては、まず、もとのはりについての $\rightarrow$ において、分布荷重 q_x から曲げモーメント分布 M_x を求めます。この計算は、 $q_x \equiv w$ に対して 2 次関数分布 (M_{Dead}) を、 $P_x \equiv P$ に対して台形分布(または中央 1 点載荷の場合は三角形分布、 M_{Live})が仮定できるとして、容易です。

その後、共役ばりについての $\rightarrow$ において、曲げモーメント分布 M_x から曲率分布 ϕ_x すなわち弾性荷重を求

めます。このとき、ひび割れを有する鉄筋コンクリートのような変断面ばりを想定すると、 $(EI)_x$ を求める必要があります。しかし、mfai.exeでは $(EI)_x$ を求めるのではなく、自ら求めたMoment–Curvature関係を用いて、 M_x から ϕ_x を検索して直接得ています。

- M_{Live} と M_{Dead} はスパン中央で最大となるため、 M_{Live} と M_{Dead} の合計である M_{Total} も、スパン中央で最大となります。このことから、3.2 (c) 2) に記したように Moment–Curvature 関係で得られた M をスパン中央の値と考えると、 M_x は必ず M 以下となります。したがって、 M_x および ϕ_x は、ある時点以前に計算された Moment–Curvature 関係の範囲に必ず存在しますから、 M_x から ϕ_x が必ずを検索可能です。この結果、Moment–Curvature 関係と Load–Displacement 関係の計算は、同時進行で行うことができます。

しかし、Moment–Curvature関係の検索による ϕ_x の決定では、鉄筋コンクリートのようにひび割れ発生時で M_x が一旦減少するときや、最大荷重以降で M_x が減少するときには、一意的に決定するのは困難となります。すなわち、同じ M_x に対して、 M_x の増加過程と減少過程において2つ以上の ϕ_x が検索され、どの ϕ_x を採用するかを別途検討しなければなりません。mfai.exeでは、その検討は行っていません。

この困難さにより、mfai.exeにおけるLoad–Displacement関係の計算結果は、最大荷重までを有効としています。

4. 操 作

以下では、入力ファイルの作成から計算の実行に至るまでの手順を追って、操作の説明を記載します。図 5 の()内は、対応する節番号を示します。

- mfai.exeの立ち上げ時は、新規入力ファイルへの設定待ち状態です。

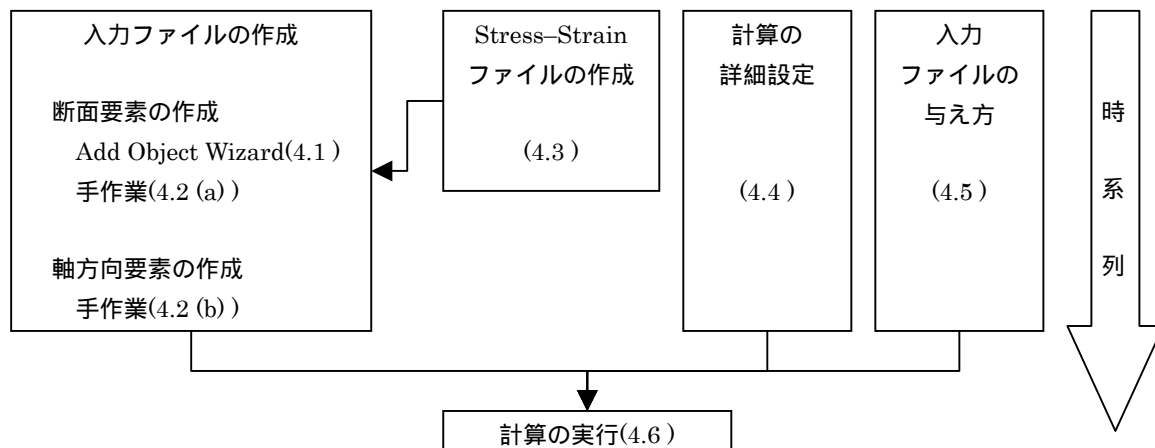


図 5 操作の基本的な手順

4.1 断面要素の作成

断面要素は、Object—Solid、Bar、PreTendon、PosTendon および External で作成します。

各 Grid を表示している間は、プルダウンメニューの Object の内容が Grid に応じて変化し、それぞれ Add Solid ~ Add External(以下、Add Object と呼びます)となります。これらのメニューにより Add Object Wizard が立ち上がり、Default Properties を持つ Object を各 Grid に追加できます。

- Default Propertiesは、最初はmfai.exeが決めています。各Gridの表示中にObject—Save Defaultを実行することにより、各Grid中で選択中のセルの最上行を、各GridのDefault Propertiesとして保存できます。
- 逆に、mfai.exeが決めているDefault Propertiesを呼出すには、Object—Load Defaultを実行します。

断面要素を作成するのは、有限要素法ほどではないにせよ、かなりの労力が必要とされるものです。ましてや、断面が円弧などの曲線で構成される場合は、その労力は激増します。Add Object Wizard は、いくつかの定型断面を対象とする場合に、寸法および Height 方向の Fibers Number または Fibers Height を与えることによって、断面要素の作成を効率的に行うための機能です。

- 定型断面を対象としていますが、寸法をうまく設定することで、多様な形状を表現できます。
- 作成した断面要素は、Grid に追加されます。Grid に既に何らかの入力がある場合は、その続きの行に追加され、上書きしてしまうことはありません。したがって、何度か Add Object Wizard を実行すれば、かなり複雑な断面形状も対象とすることができます。
- 入力した寸法は直ちに Figure に表示されますので、確認することができます。

ファイバー法では、Width 方向に非対称な断面を対象とすること自体は無理にはできなくもないのですが、断面要素の Width 方向の位置を計算上は見えていませんので、結局は対称な断面として計算していることになり、非対称性が計算結果に与える影響はありません。よって、この Wizard が対象とする定型断面は、いずれも対象断面になっています。

- ただし、断面作成のうえでは、Left も変更可能です。

Add Object のうち Add Solid では、以下の点に注意してください。

- 手入力と同じく、それぞれのファイバーを長方形とみなします。
- Whole Section が T の場合、Hollow section を持つことができません。
- Whole Section が T の場合、または Hollow section がある場合では、

上フランジに相当する部分	(Hollow section より上の部分)
ウェブに相当する部分	(Hollow section の左右の部分)
下フランジに相当する部分	(Hollow section より下の部分)

の 3 つの部分がありますが、これらの境界では必ず分割が行われます。一般に、指定した Fibers in Number または Fibers in Height とこれらの境界の位置とはうまく整合しませんが、適切に処理されます。

- Finish を押したときに、Hollow Section が Whole section からみだしている場合、すなわち、部材厚が負となる場合は、エラーとしています。逆に言うと、部材厚は 0 以上なら OK としており、各種の規定に定められている最小寸法は、そういう目的ではないので、完全に無視しチェックしません。

なお、部材の高さが負となる場合は、アルゴリズム面に対応できずエラーとせざるを得ませんが、幅が負となっても、計算上の支障はありません。しかし、負の幅の断面は実質的でないのはもちろん、図示したときに視覚的に勘違いするので、上記の通りエラーとしています。

4.2 断面要素および軸方向要素の編集

断面要素は、手作業でも作成・編集することができます。断面要素が何もない状態から作成することもできますが、通常は、4.1 の Add Object で作成した断面要素をベースに編集を加えるとよいでしょう。

一方、軸方向要素は、手作業で作成・編集します。

- 各 Grid は、表計算ソフトとよく似た操作となっています。また、表計算ソフトなどのクリップボードを経由したデータのやり取りが可能となっているほか、ツールバーの Edit に見られる各種操作が可能です。
- 自動計算される列、自動計算のためまたは不要なため入力できない列もあります。

(a) Solid、Bar、PreTendon、PosTendon、External

断面要素を編集します。

表 15 断面要素の編集

入力項目	説 明
Use	いくつかのパリエーションを記述しておき、使用するもののみにチェックします。
Output	チェックすると、その断面要素のひずみが Table—Solver や File—Solver へ出力されるようになります。

Number	同じ条件の要素がいくつあるかを入力します。2—D13 の場合は 2 を入れます。 - 同じ条件の要素は、できるだけ Number=1 になるようにまとめると計算が速くなります。このため、Solid の場合、Width 方向に断面要素の特性が異なる場合を除いて、一般に Solid は幅が Width の薄い長方形状の要素、すなわちファイバーに分割します。 - しかし、Number が 1 より大きい場合は、Figure—Section は適切ではなくなることがあります。
Width Height Diameter	Solid に対して Width と Height を入力すると、長方形断面のファイバーとして Area が求められます。 - Stress や Strain は要素内で一定とされるため、断面の上・下縁での値を正確に求めるためには、上・下縁の Solid の Height を 0 にしておくといでしょう。Add Solid の Extreme 機能を用いると、このような縁端 Solid が簡単に作成できます。 Bar、PreTendon および PosTendon に対して Diameter を入力すると、円断面として Area が求められます。 - JIS規格の異形のBarを選択した場合もAreaに自動的に公称値が入力されますが、これはmm²単位なので、ほかの単位を使っている場合はそれを参考に修正してください。 - 太径の Bar や Tendon を用いる場合などで、曲げ剛性が気になる場合は、それらもいくつかのファイバーに分割するとよいでしょう。
Depth	断面要素の上端や下端ではなく、図心の位置を入力します。
Left	断面要素の左端や右端ではなく、図心の位置を入力します。 この項目は、断面図をよりそれらしく表示するために使われるのであって、計算結果に影響を与えません。
Introduction Strain	初期ひずみを与えます。 Introduction Strain は、用いる Stress—Strain 関係にしたがって Initial Stress を発生します。したがって、クリープ、収縮、リラクセーションなどによる Strain とは異なるものであって、それらのために用いることはできません。
Watch Strain	断面要素の Strain がこの値をまたいだとき、すなわち、この値より大きくあるいは小さくなったとき、Table—Solver の該当欄に示されます。また、Option—Messages での設定にしたがって、Pause がかったり、指定した WAV ファイルが演奏されたりします。 - 一般に、断面要素の Yield Strain や最大荷重時などに対する Strain を設定するとよいでしょう。 0 を与えると 0 でウォッチするのであって、ウォッチしないときは空欄にします。 - Output がチェックされてない要素では Watch されません。逆に、Watch を設定すると、Output にもチェックが付きます。
Unit Volume	対象構造をはり(水平部材)と考える場合に、軸直角方向の活荷重と同じ方向に作用する単位

Weight	容積重量を与えます。 - 単位容積質量ではなく、重量すなわち力の単位で与えます。例えばコンクリートを 2300kg/m^3 とし、単位系に N、mm を用いる場合は、$2300 \times 9.8 / 10^9 = 0.0000225\text{N/mm}^3$ とします。 - Add Object Wizard で与えられる、mfai.exe が決めている Default Properties での値の単位は N/mm^3 です。 - 柱(鉛直部材)と考える場合では、その軸力となるわけではありません。したがって、その場合は値を 0 としておきます。
Type	File 以外を選択すると、組込みの Stress-Strain モデルを使用します。それらの詳細は文献を参照してください。組込みの Stress-Strain モデルは、その適用範囲や意味を理解したうえで使用してください。 - 適用範囲について 極端な数値に対応していないモデルや、単位系が制限されるモデルがあります。また、与えた数値すべてを使用せず、例えば、Ultimate Stress のみで決まるモデルで、Elastic Modulus を使わない場合など、結果的に与えた数値とモデルが整合しないこともあります。 - 意味について 設計用モデルと詳細モデルの違い、モデル構築に用いられた実験と解析対象の載荷状態の違いなどを考慮しなければなりません。 File を選択すると、Stress-Strain ファイルを読み込んで使用します。Stress-Strain ファイルは、4.3 に示すように、Object—Stress-Strain File により作成・編集します。 - Stress-Strain ファイルに記載された範囲を正負を超える Strain に対する Stress は、0 となります。 - Stress-Strain モデルに関する他の各種設定の多くは無効になります。すなわち、File を選択した場合に有効なのは Elastic Modulus のみで、しかも、おまけである Table—Section に出力される各種断面係数を求めるときにのみ使用しており、Moment—Curvature 関係の計算にはほとんど関係がありません。 - 各種の Stress-Strain モデルを信用しないわけではありませんが、mfai.exe では Stress-Strain ファイルを用いることを標準としたいと思います。 組込みの Stress-Strain モデルや Stress-Strain ファイルの挙動は、現在の行の Object について、Object—Chart によって確認することができます。図中、赤点は Watch Strain を示すものです。

以上の設定は、Solid、Bar、PreTendon、PosTendon あるいは External の Grid を表示しているときに Object—Figure を実行すれば、断面図として確認することができます。

- 縁端 Solid は Height が 0 なので、画面上ではほとんど確認できません。
- 縦横の縮尺は同じになるようコーディングしていますが、開発環境の制限により、そうなっていないこともあります。

Add Object では、計算により断面要素を分割し、あるいは連続配置していますので、1 回の Add Object の操作

結果では、その種類の断面要素が重複していることはありません。しかし、2 回以上行った結果や、手作業で編集を行った結果では、意図したかどうかに関わらず、同じ種類の断面要素どうしが重複してしまうこともあるでしょう。これは、実際にはあり得ない条件設定を行ったことになります。

しかし、mfai.exeでは、断面要素の重複については一切チェックを行っていません。それどころか、同じDepthとLeftの断面要素にNumberを設定することができるようになっており、意図して重複を指定することすら普通の操作となっています。

これは、ファイバー法を含む曲げの計算では、部材幅方向の位置すなわち Left を見ていないからです。すなわち、断面要素が重複している条件設定は、無限に広がる部材幅方向に重複しないように適切に配置されている条件設定と同じなので、計算のためにはチェックを行う意味がないのです。

ただし、もちろん、Figure—Section で断面図を表示させるときには、見栄え上の不都合にはなるでしょう。

(b) Beam

軸方向要素は、Object—Beam で作成します。

表 16 軸方向要素の編集

入力項目	説 明
Use	いくつかのバリエーションを記述しておき、使用するもののみにチェックします。 Beam では、全てのチェックをはずすことはできますが、2 行以上をチェックすることはできません。
Total Span Flexural Span	スパン、曲げスパンを設定します。 - グラフではスパンの半分が表示されますが、ここでは半分の値にしないでください。 - 曲げスパンは、3 点荷重を表す 0 も設定できます。これは、柱などの片持ち部材の曲げにも対応します。ただし、その場合の荷重は支点反力に相当するので、計算結果を 1/2 にする必要があります。変位はそのまま用いることができます。
Half Span Fiber Number	軸方向の分割に関して、スパンの半分に対する分割数を設定します。 - これは基本となる分割数であり、実際の分割では、スパン中央、支点および荷重点において長さが 0 の軸方向要素も作成されます。 - スパン中央および支点の長さが 0 の軸方向要素は、Add Solid における Extreme と同じ意味を持ちます。すなわち、要素の特性は要素内で一定とされるため、スパン中央および支点での値を正確に求めるために、それらの場所の要素の長さを 0 にしているわけです。 - 荷重点の長さが 0 の軸方向要素は、連続関数でない活荷重(集中荷重)を、連続関数である自重(分布荷重)となるべく同等に取り扱おうとしたためのものです。荷重点は、もちろん、この長さが 0 の軸方向要素の図心上にあります。ただ、曲げモーメントから荷重を逆算する際に、特に都合がよいというわけではありません。

Half Span Fiber Number	Total Span / Half Span Fiber Number を表示します。 • 入力できません。
---------------------------	---

以上の設定は、Beam の Grid を表示しているときに Object—Figure を実行すれば、側面図として確認することができます。

- 長さが 0 の軸方向要素は、画面上ではほとんど確認できません。
- 縦横の縮尺は同じになるようコーディングしていますが、開発環境の制限により、そうっていないこともあります。

4.3 Stress—Strain ファイルの作成

Object—Stress—Strain File により作成・編集します。

- Stress—Strain File は、Stress 列と Strain 列から構成されるテキストファイルであり、Stress と Strain の間は 1 つの TAB で区切られたものです。
- テキストエディタや表計算ソフトでも作成できます。複雑な Stress—Strain File を作成する場合は、表計算ソフトを使い、TAB 区切りのテキスト形式で保存することで作成してください。

4.4 計算の詳細設定

計算の詳細は、Tool—Option で設定します。

- 設定項目は、計算対象部材に関わらず共用するものです。したがって、計算対象部材ごとに毎回設定する必要はありませんが、逆にいうと、計算対象部材ごとに設定できません。

(a) Calculation

1) Curvature Range1 ~ Range3 およびツールバーの Step

Curvature Range1 ~ Range3 は、載荷の計算における曲率増分(4)の Step を、3 つの範囲(非負)のそれぞれで設定するためのものです。ツールバーの Step で Scheme を選択している場合、各範囲内で各 Step が使用されます。

- Scheme は、各範囲内で Step を細かくまたは粗く設定することで、計算の自動化を図るためのものです。計算中でも、ツールバーの Step を用いて Step を手動で選択することができます。
- 曲率増分(4)が Curvature Range3 の To に到達すると、計算は終了します。Scheme を選択していなくても、同様です。
- 自動で計算を行う場合は、Curvature Range3 の To をある程度大きくしておき、収束しなくなることで計算を終了させるようにするとよいでしょう。また、計算は「0 で除した」というエラーで終了することもあります。これは最大荷重以降に発生する可能性のあるもので、一般にはこれもある程度は妥当な終了といえます。
- 計算中に画面を見ている場合は、Moment—Curvature 関係で Moment が非常に小さくなったときなどで、手動で計算を終了させるとよいでしょう。

2) Convergence

収束計算における以下の項目を設定します。

表 17 計算の詳細設定—Calculation—Convergence

項 目	説 明
Iteration Max.	繰返しの回数がこの回数を超えると、収束しなくなったと判断し、計算が終了します。 繰返し回数は、収束する場合は 1～2 回からせいぜい 10 数回です。繰返し回数が Iteration Max.に達したからといって Iteration Max.を大きくしても、最終的に収束するようになることはほとんどありません。
Continue on Failure	ある種のエラーが発生したときにも、メッセージを出さずに計算を継続します。
Diff. Width	ニュートン法において微分係数すなわち傾きを求める際の、現在の変数の値からの前後への振りの割合を、 $1/10^m$ の整数値 m で設定します。詳細は 3.3 (e) を参照。
Precision	収束精度を表すパラメータで、精度 $1/10^n$ の整数値 n 。詳細は 3.3 (f) を参照。

3) Section Parameter

Object—Section Parameter あるいは File—Start で表示される Table—Section において、断面諸量の計算のための 3 種類の計算方法が、それぞれ断面要素の重複および断面要素の断面 2 次モーメントを処理するかどうか、指定します。詳細は 5.2 (b) を参照。

- 変更できない項目もあります。

(b) Output1、Output2

Chart、Figure、File、Table のうち、計算中の出力にどれを使用するかを選択します。また、Minimize するかどうかを設定します。

- Solver は、このプログラムの主たる計算結果の出力であるので、File か Table かのいずれかが必ずチェックされます。
- Table—Log は、通常は表示し、Minimize しておくのがよいでしょう。
- Minimize 子ウィンドウに対する設定です。親ウィンドウに対する設定は、☐を参照。

(c) Chart/Figure

表示中の Chart あるいは Figure の、Axis Scale と Legend を設定します。

- Axis Scale は、Chart や Figure が表示されているときのみ設定できます。
- Chart や Figure を表示したときは、毎回、表示する内容に応じて Axis Scale が自動設定されます。通常は、自動設定のままにしておくといよいでしょう。

また、表示中の Chart あるいは Figure の、

- 軸タイトルの文字の大きさ
- 軸ラベルの文字の大きさ
- 点の大きさ

を設定します。点の大きさは、ウィンドウ上に表示されている文字の幅に対する割合で設定します。

(d) SS Curve

Object—Chart で表示する Stress–Strain モデルまたは Stress–Strain ファイルにおいて、表示する Strain の範囲と打点間隔を設定します。

- 打点間隔が細かすぎるとエラーとなります。およそ 32,000 個の点を打つ細かさの打点間隔が下限です。
- しかし、多くても数 1,000 個、せいぜい 10,000 個以内の数の点を打つ程度の広めの打点間隔にする必要があるでしょう。Chart の処理速度があまり速くないからです。

(e) Messages

各種サウンドと Pause するかどうかを設定します。

表 18 計算の詳細設定—Messages

項 目	説 明	演奏時間
Sound at Start Sound at End	それぞれ計算開始時および終了時に、指定した WAV ファイルが演奏されます。	比較的長くても OK。
Sound at Convergence	載荷の計算において、収束時に、指定した WAV ファイルが演奏されます。	非常に短いのがよい。
Pause in Pre–Loading	載荷前の計算において、軸力の収束時と曲げモーメントの収束時に Pause がかかります。また、Pause が有効かどうかにかかわらず、指定した WAV ファイルが演奏されます。	比較的長くても OK。
Pause at Watch	載荷の計算において、Watch 時に Pause がかかります。また、Pause が有効かどうかにかかわらず、指定した WAV ファイルが演奏されます。	比較的長くても OK。
Pause at Live Load	載荷の計算において、Live Load が作用し始めるときに Pause がかかります。また、Pause が有効かどうかにかかわらず、指定した WAV ファイルが演奏されます。	比較的長くても OK。

- 複数の入力ファイルを与え、複数の検討ケースに対する連続計算を期待しているときは、種々の Pause を無効にしておくのがよいでしょう。
- 初期設定されている WAV ファイルは、Windows を標準的に導入した場合には存在するであろうと思われるものです。存在しない WAV ファイルを指定したり、空欄にしても問題は起こりませんが、単なる Beep 音になるようです。

(f) Misc

1) Window State

親ウィンドウの挙動を設定します。

表 19 計算の詳細設定—Misc—Window State

項 目	説 明
Minimize at Start	File—Start または File—Next で計算を開始したときに、親ウィンドウを自動的に最小化します。最小化するともちろん何も表示されなくなりますが、計算は速くなります。
Restore at Pause Focus at Pause	載荷の計算において、Pause 時に、それぞれ親ウィンドウを元に戻し、また前面に出します。Minimize at Start または手動で最小化し計算を速くしている場合にはチェックするとよいでしょう。

2) Window Arrange

計算中にリアルタイムに画面表示する子ウィンドウを、計算開始時にどのように自動配置するかを設定します。

- Minimize されているものを除き、自動配置されます。

4.5 入力ファイルの与え方

入力ファイルは以下の 3 種類の方法で与えることができます。

- 1 つあるいは複数の入力ファイルを、File—Open で与える。このとき、Shift キーや Ctrl キーを用いて複数を選択できます。
- 1 つあるいは複数の入力ファイルを、コマンドラインの引数で与える。

表 20 コマンドラインの例

コマンドラインの例	説 明
[C:¥] mfai sample.inp	MS-DOS 風。
[C:¥] mfai sample.inp sample2.inp	MS-DOS 風で複数のファイル。
[C:¥] mfai "C:¥My Documents¥sample.inp"	スペースを含むフォルダ内のファイルの絶対参照。
[C:¥] mfai "My Documents¥sample.inp"	スペースを含むフォルダ内のファイルの相対参照。

- 1 つあるいは複数の入力ファイルを、Drag & Drop で与える。

File—Open で複数の入力ファイルを与えた場合や、コマンドラインの引数または Drag & Drop で入力ファイルを与えた場合は、直ちに計算が開始されます。

複数の入力ファイルを与えた場合は、File—End により途中で強制終了したかどうかにかかわらず、それぞれについて順次計算が行われます。また、File—Solver への出力が必ず行われます。

4.6 計算の開始、中断・再開および終了

mfai.exe における計算には、2 種類があります。1 つは 3.1 で述べた Moment—Curvature 関係と Load—Displacement 関係の計算であり、これが mfai.exe の主たる機能です。もう 1 つは、断面諸量の計算です。

断面諸量の計算は、収束計算の仮定値(初期値)を求めるために、主たる計算を行う際にもその直前に行われますが、単独でも実行可能です。ただ、mfai.exe においては、断面諸量の計算はおまけ程度の扱いとしています。

- おまけの割に、断面諸量の計算にはかなり凝っています。

(a) 主たる計算の計算の開始、中断・再開および終了

表 21 主たる計算の計算の開始、中断・再開および終了

項 目	説 明
File—Start	計算を開始します。
File—Pause	計算中に中断します。また、中断中に、計算を再開します。
File—End	計算中あるいは中断中に、計算を終了します。 • 計算中に画面を見ている場合は、Moment—Curvature 関係で Moment が非常に小さくなったときなどで、手動で計算を終了させるとよいでしょう。

主たる計算は、断面要素や軸方向要素が適切に設定されていなければ、計算を開始することができません。mfai.exeの立上げ直後を含み入力ファイルの作成が十分に行われていないときや、入力ファイルの作成において入力制限をすり抜けて値を設定してしまった場合には、不適切な状態となります。

- 不適切な状態のチェックは、努力していますが完全ではない可能性があります。
ただし、「実際にあり得る状態ではないから」という理由で不適切と判断することは、むしろなるべく「しない」ようにしています。つまり、0 で除することになるなどプログラム上で不都合となる場合を除き、なるべくどんな状態でも計算するようにしています。理論に基づく計算とは本来そういうものであり、実際上の条件に基づく適用範囲を設けるべきではありません。
この点が、mfai.exeが業務ソフトとは異なる点といえるでしょう。もちろん、実際上の条件を外れた入力ファイルによる計算の意味については、別途考えておく必要はあります。すなわち、mfai.exeの挙動を理解することは、理論を理解することになり、CAE (Computer-aided Engineering)の一端を担えればと考えています。
- 一方、入力制限についても、なるべくすり抜けないように努力していますが、これも完全ではない可能性があります。手入力だけでなく、貼り付けで入力が行われる場合もあり、mfai.exeに限らず一般に、コーディングによりユーザーの入力を制限することは難しいことです。

概して、以下のケースで不適切と判断され、計算を開始しようとしたときにエラーを出します。

1) 断面要素について

表 22 断面要素の不適切な状態

不適切な状態	説 明
Solid の数が 0	Solid は必須です。詳細は 3.1 (a) を参照。
Solid の断面積の合計が 0	Solid の数が 0 であるのと同じ状態になります。Solid のヤング係数の平均値すなわち仮想断面のヤング係数を求めることができません。
Solid のヤング係数の平均値が 0	仮想断面のヤング係数が 0 の状態になります。換算率を求めることができません。

2) 軸方向要素について

表 23 軸方向要素の不適切な状態

不適切な状態	説 明
Beam の数が 0	Beam は必須です。詳細は 3.1 (b) を参照。
Beam のせん断スパンが 0	Beam の数が 0 であるのと同じ状態になります。曲げモーメントから荷重を求めることができません。

(b) 断面諸量の計算の実行

Object—Section Parameter で実行します。結果は Table—Section に表示されます。詳細は 5.2 (b) を参照。

- (a) と同様に、断面要素や軸方向要素が適切に設定されていなければ、計算を実行することができません。
- 主たる計算を行う際にもその直前に実行されますが、画面表示しても、主たる計算中には変化しません。通常、主たる計算の前に Object—Section Parameter を実行し、結果を確認しておくとともに、主たる計算においては 4.4 (b) によって表示しないようにしておくといよいでしょう。

4.7 その他の操作

一般に、各種操作はアクティブウィンドウに対して行われます。アクティブウィンドウとは、内側のウィンドウ(子ウィンドウ)のうち、現在 Focus されているものを指します。

表 24 アクティブウィンドウへの操作

メニュー		Grid	Table	Chart/Figure
File	Print	選択範囲がある場合は選択範囲が、ない場合は右方・下方の空行を除く全体が印刷されます。		グラフ全体が、 • 等倍 • 用紙幅または高さに合わせて等比率倍 • 用紙幅および高さに伸張 のいずれかの方法で印刷されます。
	Undo Redo	元に戻す・やり直しには回数に上限があります。	—	—
Edit	Copy	選択範囲あるいは現在のセルがコピーされます。		グラフ全体がコピーされます。ただし、凡例は同時にはコピーされませんので、凡例を別途右クリックしてコピーする必要があります。

	Merge Rows	チェックすると、列内で隣接する同じ数値のセルが Merge されます。見やすくなりますが編集はしにくくなることがあります。そこで、Grid では Merge なし、Table では Merge ありをデフォルトにしています。		—
	Sort Rows	選択範囲の行について、ダイアログで設定した列をキーとして Sort します。全ての行を Sort する場合は、キーとする列全体を選択してください。		—
	Save As	TAB 区切りテキスト、CSV または XLS 形式で保存します。計算の終了後に Table-Solver を TAB 区切りテキストで保存すると、数値のフォーマットは異なりますが File-Solver とほぼ同等の保存が可能です。		—
Object	Chart	現在の行の Stress-Strain モデルまたは File の様子が表示されます。	Table-Solver がアクティブウィンドウである場合、現在の列を x 、任意の列を選択して y として、Chart を描きます。さらに、現在の計算結果までの Chart — Moment-Curvature と Chart — Load-Displacement が表示されます。これは、Chart—Moment-Curvature あるいは Chart—Load-Displacement を表示しない設定にして計算速度を向上させている場合でも有効です。	—
Window	Resize	子ウィンドウがある場合はアクティブウィンドウの、ない場合は親ウィンドウの Top、Left、Width、Height を、それぞれ親ウィンドウまたはディスプレイのサイズに対する割合で設定します。画面キャプチャを行う場合に、サイズをきっちり設定するための機能です。		

- 印刷機能を貧弱に感じる場合は、ワープロソフトなどに貼り付けて体裁を整えてから印刷するとよいでしょう。
- Chart の貼り付けなど、他のソフトへの貼り付けがうまくいかない場合は、そのソフトで「形式を選択して貼り付け」を選択し、異なる形式をいくつか試してみてください。Chart や Figure では、単に貼り付けるとデータを貼り付けますから、特に注意が必要です。

5. 出 力

Option—Outputでの設定にしたがって、Chart、Figure、Tableが計算中にリアルタイムに画面表示されます。これらは、計算中あるいは計算終了後、mfai.exeの操作によりコピー、印刷あるいは保存します。

また、画面表示に加えて 1 種類の File 出力が可能です。

さらに、Tool Bar、Status Bar でも、適宜、情報が表示されます。

- 計算中に多くの情報を画面表示するほど計算が遅くなります。計算中には画面表示されているものを閉じることができないため、計算速度向上のためには、画面表示しないようにしておくか、最初から Minimize するよう設定するか、あるいは計算中には画面表示されているものを Minimize するとよいでしょう。
- 計算中に単位の変換は行っていないので、出力の単位系は、使用者が決めた入力ファイルの単位系通りとなります。単位系には、SI 単位系である N、mm を使用することを推奨します。

表 25 各種出力

種 類	名 称	説 明
Chart	Moment—Curvature Load—Displacement	Moment—Curvature 関係 Load—Displacement 関係
	Stress Total / Stress Loading Strain Total / Strain Loading Force Total / Force Loading	断面の Stress 分布 断面の Strain 分布 断面の Force 分布
	Moment Curvature Load Displacement	軸方向の Moment 分布 軸方向の Curvature 分布 軸方向の Load 分布 軸方向の Displacement 分布
	Chart—Convergence Func	収束関数
Figure	Beam Section	側面図 断面図と初期の Force
Table	Solver Section	主たる計算結果 各種の断面係数
	Solid Bar PreTendon PosTendon External	Solid の Stress、Strain、Force など Bar の Stress、Strain、Force など PreTendon の Stress、Strain、Force など PosTendon の Stress、Strain、Force など External の Force、Moment など
	Log	計算の記録
File	Solver	主たる計算結果
Tool Bar	—	Step
Status Bar	—	Moment—Total Max. など

5.1 Chart および Figure

表示中の Chart や Figure に対する操作については、マウスをその上に移動したときに現れる Tips を参照してください。

- いくつかの Chart や Figure では、グラフの見た目を重視したため、Y 軸の正負が逆になっています。開発環境の制限なので、改良はできません。
- Chart の中には、X 軸、Y 軸あるいは両方の軸について、マウスのドラッグにより、軸スケールが簡単に変更できるものもあります。

(a) Moment と Curvature、Load と Displacement

載荷の計算において求められる Moment と Curvature、Load と Displacement の単位は、例えば N と mm を使っていると、それぞれ N、1/mm、N または N/mm、および mm です。また、いずれも表 26 に示す 4 つの成分を持ちます。

表 26 Moment と Curvature、Load と Displacement の 4 つの成分

成 分	説 明
PreLoading	載荷前の計算の結果。
Dead	自重 w 以下の等分布加重による増分。
Live	活荷重 P である集中荷重による増分。
Total	PreLoading、Dead および Live の合計。

これらの各成分に対して、関連する Chart で表示されるデータは表 27 の通りです。

表 27 Moment と Curvature、Load と Displacement に関連する Chart で表示されるデータ

種 類	X 軸 \ Y 軸	Y 軸	Total	Live	Dead	PreLoading	PreLoading + Dead
Chart— Moment —Curvature	Curvature —Total	Moment	○	○	○ (Live > 0 で一定)	(常に 0)	(= Dead)
Chart— Load —Displacement	Displacement —Total	Load	(定義 しない)	○	○ (Live > 0 で一定)	(常に 0)	(= Dead)
Chart— Moment	Half Span	Moment	○	○	○ (Live > 0 で一定)	(常に 0)	(= Dead)
Chart— Curvature		Curvature	○	(意味が ない)	(意味が ない)	○ (一定)	○
Chart —Load		Load	(定義 しない)	○	○ (Live > 0 で一定)	(常に 0)	(= Dead)
Chart— Displacement		Displacement	○	(意味が ない)	(意味が ない)	○ (一定)	○

1) Moment および Load

Moment と Load は、載荷の計算から増加する数値ですから、PreLoading は常に 0 であり、Total = Live + Dead + PreLoading = Live + Dead です。Total 中の Live と Dead はそれぞれ活荷重 P である集中荷重と自重 w 以下の等分布荷重を表しますから、両者を分離して単独で表示しています。

- Live は Total と Dead の差ですから、Chart 上では Total の曲線と Dead の曲線の距離として確認でき、不要といえは不要です。

Dead は、Live が発生するようになると一定値 w となります。すなわち、載荷の計算において曲率増分に応じて得られる曲げモーメントはスパン中央における Total であると考え、 w によるスパン中央の曲げモーメント $wl^2/8$ 以下の場合は w 以下の等分布荷重によるもの、 $wl^2/8$ を超えると $wl^2/8$ と P によるものと考えて、Live と Dead をそれぞれ計算しています。

Totalの定義

Load の Dead は分布荷重であり、Live は集中荷重です。これらの単位は異なりますが、工夫をすることで Total = Live + Dead を定義することはできます。しかし、両者をともに分布荷重と見るようにしても、集中荷重と見るようにしても、Chart で表示する意味がありませんので、Total は定義していません。これは、以下の理由によります。

まず、両者を分布荷重と見ることを考えると、 P をある載荷幅で除する必要があります。すなわち、載荷点の位置に、ある幅の Half Span Fiber を自動的に設置し、その幅一杯に P が載っていると考えるコーディングは可能です。しかし、この幅は、分布荷重としての P が数学的には

$$P(x) = P \cdot \delta(x - c) \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{ここに、} c : \text{載荷点の位置、} \delta(x - c) = \begin{cases} \infty & (x = c) \\ 0 & (x \neq c) \end{cases}$$

と表され、載荷点の位置 c において幅の逆数が ∞ にならなければならないことから分かるように、本来は 0 でなければなりません。0 で除するそのような処理は、もちろんコンピュータでは無理です。Fiberの幅のある正值とすることも考えられますが、 P をその幅で除した値は、幅の大小によって大小するものですから、Chartで表示する意味がありません。結局、mfai.exeでは P を集中荷重のままLiveとして表示(例えば単位:N)しています。ただし、載荷点直下に、幅が 0 のFiberは自動的に作成しています。これは、mfai.exeでは軸方向をHalf Span Fiberによって離散的に取り扱っているために、中点が載荷点の位置にあるFiberを存在させ、Liveだけを別途処理する必要をなくするためにです。

一方、両者を集中荷重と見ることを考えると、上記の通りmfai.exeでは軸方向をHalf Span Fiberによって離散的に取り扱い、各Fiberの midpoint に荷重が集中すると考えていることから、この見方は適切です。 P はもともと集中荷重であり、上記のように幅が 0 のFiberを自動的に作成することでDeadと同列に処理することができます。Deadを集中荷重扱いするのはさらに容易で、というよりそのようにしなければコンピュータでは取り扱えず、単位長さあたりの荷重に各Fiberの幅を乗じ、作用位置を各Fiberの中央にするだけです。しかし、Deadについて、単位長さあたりの自重に各Fiberの幅を乗じた値は、各Fiberの幅の大小によって大小するものですから、Chartで表示する意味がありません。結局、mfai.exeでは w 以下の荷重を分布荷重のままDeadとして表示(例えば単位:N/mm)しています。

以上より、両者を分布荷重と見るようにしても、集中荷重と見るようにしても、Total のうち Dead か Live かのいずれかが Chart で表示する意味のない数値となりますから、Total は定義していません。

2) Curvature および Displacement

Curvature と Displacement では、 $\text{Total} = \text{Live} + \text{Dead} + \text{PreLoading}$ です。Curvature と Displacement は載荷前の計算により値を有しており、その値が PreLoading です。ただし、載荷の計算中には変化しません。

mfai.exeでは非線形材料を取り扱いますので、一般に、重ね合わせの原理が成り立ちません。すなわち、MomentやLoadのLiveまたはDeadがそれぞれ単独で作用したときのCurvatureやDisplacementを加算(重ね合わせ)することでは、 $\text{Total} = \text{Live} + \text{Dead}$ の作用による値を求めることはできません。よって、MomentやLoadとは異なり、LiveやDeadの単独の値にはあまり意味がありません。そこで、MomentやLoadの

- PreLoading に対する値
- PreLoading + Dead に対する値
- Total に対する値

を、それぞれ PreLoading、PreLoading + Dead、Total として表示しています。Live は Total と PreLoading + Dead の差、Dead は PreLoading + Dead と PreLoading の差として、Chart 上では見ることができます。

(b) Chart—Moment—Curvature

Moment は、Total、Live、Dead とともに、載荷前の計算により断面内の軸力と曲げモーメントが釣合っている完成した構造に対する、載荷の計算における外力としての曲げモーメントです。すなわち、載荷の計算において 0 から増加します。一方、Curvature は Introduction Strain を与えた初期段階を 0 とする値であり、Moment とは異なり、完成した構造において 0 とする値ではありません。完成した構造においては、載荷前の計算により Curvature—PreLoading を有しており、その値は 3.2 (b) に示した曲率増分(1) + (2) + (3)です。

これらのことから、例えば断面の下方に偏心している圧縮軸力がある場合、載荷の計算の最初における曲率は負値であり、この時点で外力としての Moment を 0 とするため、Chart—Moment—Curvature では原点を通りません。

Moment—Curvature 関係は断面の性質ですから、軸方向に同一断面としてモデル化できる必要があります。すなわち軸方向に断面が変化しない mfai.exe においては、この関係は軸方向の位置とは無関係です。また、Moment が Live か Dead かあるいは Total かも無関係です。しかし、得られた Moment—Curvature 関係を用いてその後に自重を考慮した Load—Displacement 関係を計算するにあたり、以下のように考えて、計算を続けています。

- 得られた Moment—Curvature 関係は、スパン中央のものであると考える。
- 得られた Moment と Curvature は、Dead + Live と考える。

(c) Chart—Load—Displacement

(b) と同様に、Load は、Live、Dead とともに、載荷の計算における外力としての荷重であり、載荷の計算において 0 から増加します。一方、Displacement—Total は完成した構造においてたわみ PreLoading を有しています。したがって、(b) の例では、載荷の計算の最初におけるたわみは、負値の曲率に応じて上反りが生じており、Chart—Load—Displacement では原点を通りません。

Live は対称 2 点載荷の集中荷重であり、載荷の計算において最初に載荷される自重 w 以下の等分布荷重が w に至るまでは、0 となります。たわみは w 以下の等分布荷重によっても増加しますので、 $w > 0$ の場合は、 w によるたわみの時点で、Live の曲線は折れ曲がります。そして、その時点以前では Live が Displacement–Total 軸に沿う(Live = 0)ので、(b) の例のような偏心がなくても、原点を通っていないように見えます。

(d) Chart—Stress Total と Chart—Stress Loading 等

Stress、Strain あるいは Force の断面分布については、Total と Loading の 2 種類があります。これらのうち Total は、Introduction Strain を与える前の状態を 0 とする値です。

一方、Loading は、載荷前の計算および載荷の計算の各段階において、それぞれの段階の開始前の値を、Total から差し引いた値です。したがって、それぞれの段階で追加された内力あるいは外力による Stress、Strain あるいは Force の増分を確認することができます。

- 最も分かりやすく意味もある Chart は Strain Loading であり、Introduction Strain に関わらずどの段階でも必ず平面上にあることが確認できます。

(e) Chart—Moment、Chart—Load

Chart—Moment では Moment の Total が表示されますが、(a) で述べたように、Chart—Load では Load の Total 定義しておらず、表示されません。

Load の Live と Dead は、それぞれ荷重の単位、単位長さあたりの荷重の単位と単位が異なるのですが、重ねて表示していますので注意が必要です。これらのうち、Live は集中荷重であり、載荷点で尖った三角形のように表示されます。これは、載荷点の位置の Half Span Fiber(幅は 0)だけが正值を有しているからです。Dead は等分布荷重ですので、Half Span に渡って一定の値になります。

(f) Chart—Curvature、Chart—Displacement

Chart—Moment—Curvature や Chart—Load—Displacement と同様に、載荷前の計算で曲率を有してる場合は、支点で Curvature = 0 や中央で Displacement = 0 となりません。

(g) Chart—Convergence Func

1) 載荷前の計算

表 12 に示すように、載荷前の計算では

- 上縁の Strain 増分を変数とした収束計算
- 計算上の中立軸位置と上縁の Strain 増分の 2 つを変数とした 2 重の収束計算

が行われます。これらのうち、計算上の中立軸位置を変数とする 2 重の収束計算の段階において、収束関数である $N^+ - N^-$ と $M^+ - M^-$ の挙動を、上縁の Strain 増分は固定したうえで計算上の中立軸位置を上縁から下縁まで変化させて、それぞれ左右の Chart に表示します。 $N^+ - N^- \rightarrow 0$ かつ $M^+ - M^- \rightarrow 0$ となる計算上の中立軸位置が解ですから、それぞれの Chart の Y 切片が解となっています。実際に得ている解は ● で表示されています。

- 計算上の中立軸位置を上縁にすると、Strain 増分分布を計算することができず、よって $N^+ - N^-$ と $M^+ - M^-$ が計算できません。これに対し、計算上の中立軸位置を上縁に非常に近くすることを考えると、そ

の場合は各位置の Strain 増分は正または負に非常に大きくなり、圧縮または引張で破壊する領域となりますので、各断面要素の応力は 0 となります。このことから、計算上の中立軸位置を上縁にする場合は $N^+ - N^- = 0$ と $M^+ - M^- = 0$ と図示しています。載荷の計算でも同様です。

2) 載荷の計算

一方、載荷の計算では、

- 計算上の中立軸位置を変数とした収束計算

が行われます。これに対し、載荷前の計算と同様に、収束関数である $N^+ - N^-$ の挙動を、上縁の Strain 増分は固定したうえで計算上の中立軸位置を上縁から下縁まで変化させて、左の Chart に表示します。 $N^+ - N^- \rightarrow 0$ となる計算上の中立軸位置が解ですから、この Chart の Y 切片が解となっています。実際に得ている解は ● で表示されています。

右の Chart は $M^+ - M^-$ を示したのですが、載荷の計算では $M^+ - M^-$ の値が発生する曲げモーメントを表します。また、Y 軸上には得られた計算上の中立軸位置を ● で、また曲線上にはその最小値を ● で示しています。 $M^+ - M^-$ の最小値の意味は…。

- ひび割れ発生や塑性変形のない断面要素のみからなる断面の場合では、計算上の中立軸位置で、 $M^+ - M^-$ は最小となります。逆に、最小の曲げモーメントとなるよう、計算上の中立軸位置が求められるといえます。

5.2 Table

表示中の Table に対する操作については、マウスをその上に移動したときに現れる Tips を参照してください。

(a) Table—Solver

mfai.exeの主たる計算の結果です。

- Table—Solver が非常に大きくなり計算が遅くなってしまう場合は、代わりに、同等の Output である File—Solver を使用することも考えられます。
- 断面要素の Strain は、それぞれの Grid で Output にチェックしたもののみ出力されます。ただし、Number が 1 より大きくても、その断面要素については 1 列に出力されます。

(b) Table—Section

3 種類の計算方法による断面諸量の計算結果を表示します。

- 画面表示しても、主たる計算中には変化しません。通常、主たる計算の前に Object—Section Parameter を実行し、結果を確認しておくとともに、主たる計算においては 4.4 (b) によって表示しないようにしておくといでしょう。
- 計算方法に 3 種類あるのは、Solid 上に他の断面要素が重複して配された場合に、その断面積を考慮する方法に 3 種類を用意しているからであり、3 種類とも誤差を含んでいるからです。
- この誤差のそもそもの原因は、断面要素の配置において、「Solidは、他の断面要素を差し引いた形状であるとする必要はない」という機能があることです。重複の差し引き処理において、誤差が発生します。有限要素法では要素が重なっていることは許されませんが、mfai.exeでは許してしまっているのです。

1) 断面要素の単体での断面諸量

まず、断面要素の単体での断面諸量は、表 28 のようにして計算されます。

表 28 断面要素の単体での断面諸量

断面諸量	説 明	Solid	Bar、PreTendon、PosTendon
形状・寸法		矩形・ $b_{Solid}^i \times h_{Solid}^i$	円・ D^i
A	断面積。	$A_{Solid}^i = b_{Solid}^i h_{Solid}^i$	$A^i = \pi D^{i^2} / 4$
I	図心を通り X 軸に平行な軸に関する断面 2 次モーメント。	$I_{Solid}^i = b_{Solid}^i h_{Solid}^{i^3} / 12 = A_{Solid}^i h_{Solid}^{i^2} / 12$	$I^i = \pi D^{i^4} / 64 = A^{i^2} / 4\pi$
n	ヤング係数による断面面積の換算率。	仮想断面に対して、 $n_{Solid}^i = E_{Solid}^i / E_{Imag}$	仮想断面に対して、 $n^i = E^i / E_{Imag}$
		重複している 基材の断面要素に対して、 $n_{Base}^i = n_{Imag}^i = E_{Imag}^i / E_{Imag} = 1$	重複している 基材の断面要素に対して、 $n_{Base}^i = n_{Solid}^i = E_{Solid}^i / E_{Imag}$

- D^i は、異形断面の場合もあるため、 $A^i = \pi D^{i^2} / 4$ を用いて A^i から逆算します。
- mfai.exeのようにSolidのヤング係数がそれぞれ異なる可能性があるときは、他の断面要素の換算のための基となるヤング係数をどのように与えるかが問題です。mfai.exeでは、Solidのみについて混合則により $E_{Imag} = \sum_i E_{Solid}^i A_{Solid}^i / \sum_i A_{Solid}^i$ として求めた E_{Imag} を用いており、このヤング係数を有しSolidと同じ形状・寸法の断面要素からなる仮想断面を定義します。そして、仮想断面に対する換算率を $n^i = E^i / E_{Imag}$ としています。 E_{Imag} をこのようにして与える結果、Solidのヤング係数 E_{Solid}^i も E_{Imag} とは異なるため、 $n_{Solid}^i = E_{Solid}^i / E_{Imag}$ により換算されます。なお、 E_{Imag} は、重複の差し引き前のSolidの断面積を用いて計算されます。
- Solid に対する基材は仮想断面、他の断面要素に対する基材は Solid です。これらの断面要素が重複している、その基材となる断面要素への換算率は、 $n_{Base}^i = E_{Base}^i / E_{Imag}$ となります。なお、仮想断面では E_{Imag} は一定ですので、 $E_{Imag}^i = E_{Imag}$ です。

2) 3 種類の計算方法の違い

3 種類の計算方法の違いは、断面要素の重複の処理と断面要素の断面 2 次モーメントの処理の 2 点にあります。それらの詳細を表 29 に示します。

表 29 断面諸量の計算のための 3 種類の計算方法の相違点

種 類	断面要素の重複の処理	断面要素の断面 2 次モーメントの処理
1: Before	デフォルトではチェックされ、断面諸量の計算前に、個々の Solid の断面積から、その上に重複している他の個々の断面要素の断面積を差し引きます。 Tool—Option により、差し引かないように設定可能。	デフォルトではチェックされ、全ての断面要素の図心周りおよび平行移動分の断面 2 次モーメントを考慮します。 Tool—Option により、図心周りの断面 2 次モーメントは考慮しないように設定可能。
2: After	断面諸量の計算中に、Solid の断面積の合計から、その上に重複している他の断面要素の断面積の合計を差し引きます。	
3: Skimp	重複していても、Solid の断面積から他の断面要素の断面積を差し引きません。	デフォルトではチェックされず、Solid 以外の断面要素について、平行移動分は考慮しますが図心周りの断面 2 次モーメントは考慮しません。 Tool—Option により、図心周りの断面 2 次モーメントも考慮するように設定可能。

Tool—Option での設定により Inertia と Overlap の設定の組み合わせを同じにした場合は、3 種類の計算方法は同じ計算結果を与えることが期待されます。実際は、1: Before と 3: Skimp は全く同じ解を与えますが、2: After は少し異なります。

- 断面要素の重複の処理と断面要素の断面 2 次モーメントの処理を行う部分を除き、1: Before と 3: Skimp は全く同じコードになっています。

また、断面要素が重複していなければ、断面要素の重複の処理の設定は計算結果に影響を与えず、かつ、断面要素の重複の処理に関する誤差を含まなくなります。

- ただし、mfai.exeでは重複していない断面要素でも必ず平面保持しますので、重複していないことに意味があるかどうかを考える必要があります。

以下では、デフォルト設定の場合の 3 種類の計算方法について、更に詳しく記します。

1: Before

断面の重複を断面諸量の計算前に差し引き処理し、重複をなくします。したがって、後のMoment—Curvatureの計算が厳密になるとともに、コーディングが非常にスマートになります。したがって、mfai.exeではこの方法を基本としています。しかし、以下の点において、1: Beforeは誤差を含み得ます。

- 3.3 (a) に示した方法で個々の Solid の断面積が差し引かれることから、差し引かれる Solid は、他の断面要素の図心がその内部あるいは境界線上にあるという条件の Solid だけであり、これは実際とは異なります。

差し引かれた Solid の断面積が負になることもあります。

- 差し引き後の Solid は、円断面としている他の断面要素を矩形としている Solid から差し引いた形状であり、矩形ではなくなっていますが、断面 2 次モーメントは矩形として計算しています。

断面積が負になることもある差し引き後の Solid の断面 2 次モーメント I_{Solid}^{i*} を、形状が矩形のままと考えて計算するにあたっては、幅 b_{Solid}^i または高さ h_{Solid}^i のどちらを差し引くかを考える必要があります。どちらを差し引いても、その値が負になれば I_{Solid}^{i*} は負となりますから、断面全体の断面 2 次モーメントを求める際の各断面要素の断面 2 次モーメントの積算において、コーディング上で場合分けの必要がなく都合です。しかし、 I_{Solid}^{i*} の計算結果は異なります。そこで、mfai.exe では、幅 b_{Solid}^i は他の断面要素の直径 D^i より大きいと考え、断面積の減少は b_{Solid}^i の減少とし、高さ h_{Solid}^i は変化させていません。そして、

$$I_{Solid}^i = \frac{b_{Solid}^i h_{Solid}^{i3}}{12} = \frac{(A_{Solid}^i / h_{Solid}^i) h_{Solid}^{i3}}{12} = \frac{A_{Solid}^i h_{Solid}^{i2}}{12} \dots\dots\dots (11)$$

を用いて、他の断面要素の断面積を差し引いた Solid の断面積 A_{Solid}^{i*} を代入し、 I_{Solid}^{i*} を計算しています。

ただし、Solid の幅 b_{Solid}^i と高さ h_{Solid}^i の両方が 0 の場合は、上記の方法は適用できません。すなわち、もとの断面積は $A_{Solid}^i = 0$ なので差し引き後の断面積は $A_{Solid}^{i*} \leq 0$ となりますが、そのうち $A_{Solid}^{i*} < 0$ の場合の I_{Solid}^{i*} を求めるにあたって、 b_{Solid}^{i*} と h_{Solid}^{i*} が決められません。そこで、mfai.exe では、 b_{Solid}^i と h_{Solid}^i の両方が 0 の場合は、 I_{Solid}^{i*} を求めることを考慮して、例外的に他の断面要素の断面積を差し引きません。差し引かないので、 $A_{Solid}^{i*} = A_{Solid}^i = 0$ ですから、寸法も $b_{Solid}^{i*} = b_{Solid}^i = 0$ 、 $h_{Solid}^{i*} = h_{Solid}^i = 0$ としても差支えがなくなり、 $I_{Solid}^{i*} = I_{Solid}^i = 0$ とも適合します。さらに、このような寸法が 0 の Solid と重複していることは、実際の状況を考えて重複していない状態を意味しますから、差し引かないことは実際の状況とも適合しています。

- b_{Solid}^i と h_{Solid}^i の一方だけが 0 の場合は、0 でない方を変化させず、0 の方を負値にすれば対応できます。しかし、この場合についても実際の状況を考えて、両方が 0 の場合と同様に、例外的に他の断面要素の断面積を差し引きません。3.3 (a) も参照して下さい。

2: After

換算断面に対する計算において誤差を含み得ます。すなわち、1: Before と同様、3.3 (a) に示した方法で個々の Solid の断面積を差し引くにあたり、差し引かれる Solid のヤング係数を、他の断面要素の図心とその内部あるいは境界線上にあるという条件の Solid だけ(の平均値)のヤング係数としており、これは実際とは異なります。

2: After は、差し引き後の Solid の形状を矩形などと仮定しなくてよい分、1: Before より正確かもしれませんが、ただ、その後の計算(コーディング)はスマートではありません。

3: Skimp

1: Before のように断面の重複を差し引き処理しませんのでその後の Moment–Curvature の計算は厳密ではありませんが、1: Before と同様、コーディングは非常にスマートになります。しかし、3: Skimp は簡易計算法で、Solid 以外の断面要素の断面積の考慮の方法のほかに、それらの断面要素の断面 2 次モーメントの処理においても違いがあり、誤差を含みます。

この方法は、鉄筋コンクリートの教科書などに見られることもある方法です。例えば鉄筋コンクリートの単鉄筋長方形断面では、以下のように計算できます。

まず、

$$A_c = bh, \quad y'_c = y_c = h/2, \quad I_c = bh^3/12 \dots\dots\dots (12)$$

ここまでの計算で終わるのは、鉄筋を全く無視した最も簡易な計算方法です。3: Skimp では、鉄筋の断面積を換算するとともに、その平行移動分の断面 2 次モーメントを考慮して、以下のように計算しています。

$$n = E_s/E_c, \quad A = A_c + nA_s, \quad y' = \frac{A_c y'_c + nA_s d_s}{A}, \quad y = h - y',$$

$$I = \left\{ \underbrace{I_c}_{\text{図心周り}} + \underbrace{(y'_c - y')^2 A_c}_{\text{平行移動}} \right\} + n \left\{ \underbrace{0}_{\text{図心周り}} + \underbrace{(d_s - y')^2 A_s}_{\text{平行移動}} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

3) 仮想断面のヤング係数への換算の意味

ところで、このように仮想断面のヤング係数 E_{img} に対して換算することにはどのような意味があるのでしょうか。そもそも、換算することにはどんな意味があるのでしょうか。

また、例えば鉄筋コンクリートでは、普通は鉄筋をコンクリートに換算しますが、コンクリートを鉄筋に換算しないのはなぜでしょうか。

これらのことを理解するためには、断面諸量を求める理由に立ち返る必要があります。

まず、断面諸量のうち y' は、図心(重心)の位置ですから、(断面 1 次)モーメントのバランスが取れてさえいれば、どんな一定のヤング係数に対して換算しても、 y' は同じ値となります。すなわち、換算することは、ヤング係数(重心を考える場合は密度に相当)の違いを、相対的に比率で表現するという意味があります。

次に、断面諸量のうち A 、 I および E は、mfai.exe については 3.2 に記したように、一般に、断面の縁端応力あるいはひずみを求めるために、それぞれ P/A あるいは P/EA 、 $-M/Z' = -M/I \cdot y'$ あるいは $-M/EZ' = -M/EI \cdot y'$ において用います。ここで、断面の縁端が Solid で構成されている場合は、その応力・ひずみは Solid の応力・ひずみとなりますから、これらの断面諸量は、Solid の応力・ひずみを求めるためのものでなければなりません。そのためには、各断面要素を Solid に対して換算すると、都合がよくなります。

- 鉄筋コンクリートでは断面の縁端はコンクリートであり、コンクリートの縁端応力・ひずみが、曲げひび割れ発生や圧潰において重要です。このことから、鉄筋コンクリートでは鉄筋をコンクリートに換算すると都合がよくなります。
- 換算そのものは、どちらからどちらに行っても構いません。

さらに、Solidのヤング係数がそれぞれ異なる場合は、断面の縁端にある、応力・ひずみを求めたいSolidに対して換算することになるでしょう。ただ、断面の縁端にあるSolidが複数あり、それらのヤング係数が異なる場合もあり得ます。そこで、mfai.exeでは、いっそ全Solidについて混合則により求めた E_{Imag} に対して換算しているのです。

- mfai.exeでは、断面諸量を用いて計算した縁端ひずみは、載荷前の計算における収束計算の初期値でしかありません。また、そもそも線形弾性挙動を示す断面要素でない場合もあります。これらより、おおよそのSolid上縁Strain増分が得られれば十分なので、 E_{Imag} に対して換算しています。また、コーディング面から見てもスマートです。

一方、これらの断面諸量は、たわみを求める際にも用いられます。その場合、単独ではなく、線形弾性挙動を示す断面では曲げ剛性 EI のかたちで用いられます。ここで、 E は換算の基となる E_{Imag} に等しく、 E_{Imag} に応じて I が変化する結果、どんな一定のヤング係数に対して換算しても、 EI は同じ値となります。 EA についても同様のことが言えます。

4) 断面諸量の説明と計算式

g Section および c、d、e Section は、それぞれ Table—Section に示されている状態の断面です。3 種類の計算方法について、それぞれの断面ごとに、それぞれの断面諸量の説明とそれらの計算式を以下に示します。

- A_{Solid}^{i*} は、1: Before の計算方法において、断面の重複を断面諸量の計算前に差し引き処理し、重複をなくした後の Solid の断面積です。すなわち、 i 番の Solid から、その上に重複している j 番の Bar、 k 番の PreTendon、 l 番の PosTendon を差し引いた断面積であり、以下のように表現できます。

$$A_{Solid}^{i*} = A_{Solid}^i - \underbrace{A_{Bar}^j + A_{PreTendon}^k + A_{PosTendon}^l}_{\text{Objects on Solids}} \dots\dots\dots (14)$$

表 30 断面諸量の計算
g Section: Solid + Bar + PreTendon + PosTendon

断面諸量	説 明	計算式
------	-----	-----

A	断面積。全ての断面要素の断面積の合計。	$A = \left\{ \begin{array}{l} 1: \sum_i A_{Solid}^{i*} \\ \sum_i A_{Solid}^i - \sum_j A_{Bar}^j \\ 2: \quad \quad \quad - \sum_k A_{PreTendon}^k \\ \quad \quad \quad - \sum_l A_{PosTendon}^l \\ 3: \sum_i A_{Solid}^i \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \text{Objects} \\ \text{on Solids} \end{array} \right\}$ $+ \sum_i A_{Bar}^i + \sum_i A_{PreTendon}^i + \sum_i A_{PosTendon}^i$
y'	上縁から図心までの距離	$y' A = \left\{ \begin{array}{l} 1: \sum_i A_{Solid}^{i*} d_{Solid}^i \\ \sum_i A_{Solid}^i d_{Solid}^i - \sum_j A_{Bar}^j d_{Bar}^j \\ 2: \quad \quad \quad - \sum_k A_{PreTendon}^k d_{PreTendon}^k \\ \quad \quad \quad - \sum_l A_{PosTendon}^l d_{PosTendon}^l \\ 3: \sum_i A_{Solid}^i d_{Solid}^i \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \text{Objects} \\ \text{on Solids} \end{array} \right\}$ $+ \sum_i A_{Bar}^i d_{Bar}^i + \sum_i A_{PreTendon}^i d_{PreTendon}^i + \sum_i A_{PosTendon}^i d_{PosTendon}^i$
I	図心を通り X 軸に平行な軸に関する断面 2 次モーメント。全ての断面要素の断面 2 次モーメントの合計。	$I = \left\{ \begin{array}{l} 1: \sum_i \left[A_{Solid}^{i*} h_{Solid}^i{}^2 / 12 + (d_{Solid}^i - y')^2 A_{Solid}^{i*} \right] \\ \sum_i \left[I_{Solid}^i + (d_{Solid}^i - y')^2 A_{Solid}^i \right] \\ 2: \quad \quad \quad - \sum_j \left[I_{Bar}^j + (d_{Bar}^j - y')^2 A_{Bar}^j \right] \\ \quad \quad \quad - \sum_k \left[I_{PreTendon}^k + (d_{PreTendon}^k - y')^2 A_{PreTendon}^k \right] \\ \quad \quad \quad - \sum_l \left[I_{PosTendon}^l + (d_{PosTendon}^l - y')^2 A_{PosTendon}^l \right] \\ 3: \sum_i \left[I_{Solid}^i + (d_{Solid}^i - y')^2 A_{Solid}^i \right] \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \text{Objects} \\ \text{on Solids} \end{array} \right\}$ $+ \sum_i \left[I_{Bar}^i + (d_{Bar}^i - y')^2 A_{Bar}^i \right] + \sum_i \left[I_{PreTendon}^i + (d_{PreTendon}^i - y')^2 A_{PreTendon}^i \right]$ $+ \sum_i \left[I_{PosTendon}^i + (d_{PosTendon}^i - y')^2 A_{PosTendon}^i \right]$

表 31 断面諸量の計算

c Section: Eq. Solid d Section: Eq. Solid + Eq. Bar + Eq. PreTendon

e Section: Eq. Solid + Eq. Bar + Eq. PreTendon + Eq. PosTendon

断面諸量	説 明	計算式
------	-----	-----

A	換算断面積。 対象断面要素の換算断面積の合計。	$A = \left\{ \begin{array}{l} 1: \sum_i n_{Solid}^i A_{Solid}^{i*} \\ \sum_i n_{Solid}^i A_{Solid}^i - \sum_j n_{Base}^j A_{Bar}^j \\ 2: \quad \quad \quad - \sum_k n_{Base}^k A_{PreTendon}^k \\ \quad \quad \quad - \sum_l n_{Base}^l A_{PosTendon}^l \\ 3: \sum_i n_{Solid}^i A_{Solid}^i \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Objects} \\ \text{on Solids} \end{array}$ $+ \sum_i n_{Bar}^i A_{Bar}^i + \sum_i n_{PreTendon}^i A_{PreTendon}^i + \sum_i n_{PosTendon}^i A_{PosTendon}^i$
y'	上縁から図心までの距離	$y' A = \left\{ \begin{array}{l} 1: \sum_i n_{Solid}^i A_{Solid}^{i*} d_{Solid}^i \\ \sum_i n_{Solid}^i A_{Solid}^i d_{Solid}^i - \sum_j n_{Base}^j A_{Bar}^j d_{Bar}^j \\ 2: \quad \quad \quad - \sum_k n_{Base}^k A_{PreTendon}^k d_{PreTendon}^k \\ \quad \quad \quad - \sum_l n_{Base}^l A_{PosTendon}^l d_{PosTendon}^l \\ 3: \sum_i n_{Solid}^i A_{Solid}^i d_{Solid}^i \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Objects} \\ \text{on Solids} \end{array}$ $+ \sum_i n_{Bar}^i A_{Bar}^i d_{Bar}^i + \sum_i n_{PreTendon}^i A_{PreTendon}^i d_{PreTendon}^i + \sum_i n_{PosTendon}^i A_{PosTendon}^i d_{PosTendon}^i$
I	図心を通り X 軸に平行な軸に関する換算断面 2 次モーメント。対象断面要素の換算断面 2 次モーメントの合計。	$I = \left\{ \begin{array}{l} 1: \sum_i n_{Solid}^i \left[A_{Solid}^{i*} h_{Solid}^2 / 12 + (d_{Solid}^i - y')^2 A_{Solid}^{i*} \right] \\ \sum_i n_{Solid}^i \left[I_{Solid}^i + (d_{Solid}^i - y')^2 A_{Solid}^i \right] \\ 2: \quad \quad \quad - \sum_j n_{Base}^j \left[I_{Bar}^j + (d_{Bar}^j - y')^2 A_{Bar}^j \right] \\ \quad \quad \quad - \sum_k n_{Base}^k \left[I_{PreTendon}^k + (d_{PreTendon}^k - y')^2 A_{PreTendon}^k \right] \\ \quad \quad \quad - \sum_l n_{Base}^l \left[I_{PosTendon}^l + (d_{PosTendon}^l - y')^2 A_{PosTendon}^l \right] \\ 3: \sum_i n_{Solid}^i \left[I_{Solid}^i + (d_{Solid}^i - y')^2 A_{Solid}^i \right] \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Objects} \\ \text{on Solids} \end{array}$ $+ \sum_i n_{Bar}^i \left[I_{Bar}^i + (d_{Bar}^i - y')^2 A_{Bar}^i \right] + \sum_i n_{PreTendon}^i \left[I_{PreTendon}^i + (d_{PreTendon}^i - y')^2 A_{PreTendon}^i \right]$ $+ \sum_i n_{PosTendon}^i \left[I_{PosTendon}^i + (d_{PosTendon}^i - y')^2 A_{PosTendon}^i \right]$

さらに、

表 32 断面諸量の計算(Section 共通)

断面諸量	説 明	計算式
------	-----	-----

EA	引張剛性。g Section では全ての、他の Section では対象断面要素の、引張剛性の合計。 g Section と e Section では同じ結果となる。	$EA = \left\{ \begin{array}{l} 1: \sum_i E_{Solid}^i A_{Solid}^{i*} \\ \sum_i E_{Solid}^i A_{Solid}^i - \sum_j E_{Base}^j A_{Bar}^j \\ 2: \quad \quad \quad - \sum_k E_{Base}^k A_{PreTendon}^k \\ \quad \quad \quad - \sum_l E_{Base}^l A_{PosTendon}^l \\ 3: \sum_i E_{Solid}^i A_{Solid}^i \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Objects} \\ \text{on Solids} \end{array}$ $+ \sum_i E_{Bar}^i A_{Bar}^i + \sum_i E_{PreTendon}^i A_{PreTendon}^i + \sum_i E_{PosTendon}^i A_{PosTendon}^i$
w	単位長さ重量。g Section では全ての、他の Section では対象断面要素の、単位長さ重量の合計。 g Section と e Section では同じ結果となる。	$w = \left\{ \begin{array}{l} 1: \sum_i \rho_{Solid}^i g \cdot A_{Solid}^{i*} \\ \sum_i \rho_{Solid}^i g \cdot A_{Solid}^i - \sum_j \rho_{Base}^j g \cdot A_{Bar}^j \\ 2: \quad \quad \quad - \sum_k \rho_{Base}^k g \cdot A_{PreTendon}^k \\ \quad \quad \quad - \sum_l \rho_{Base}^l g \cdot A_{PosTendon}^l \\ 3: \sum_i \rho_{Solid}^i g \cdot A_{Solid}^i \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Objects} \\ \text{on Solids} \end{array}$ $+ \sum_i \rho_{Bar}^i g \cdot A_{Bar}^i + \sum_i \rho_{PreTendon}^i g \cdot A_{PreTendon}^i + \sum_i \rho_{PosTendon}^i g \cdot A_{PosTendon}^i$

- y' は、断面要素を配置したときに想定した X 軸から図心までの距離です。しかし、Table—Section では $y' = y' -$ (上縁位置) とし、上縁からの距離として表示しています。また、上縁側の断面係数 $Z' = I/y'$ を求める際にも、断面係数が縁端応力を求めるための数値であることを考慮し、 $Z' = I/(y' - \text{上縁位置})$ としています。断面要素の配置の際に上縁の位置を 0 とすれば、意味が分かりやすくなります。

Table—Section に示されるその他の数値は、以上の各値から計算されます。それらの意味は下記の通りです。

表 33 断面諸量の計算(Section 共通、他の諸量から計算される値)

断面諸量	説 明	計算式
y	Beam Bottom から図心までの距離。	$y = h - y'$
Z'	上縁側の断面係数。	$Z' = I/y'$
Z	下縁側の断面係数。	$Z = I/y$
E	EA を A で除した値。g Section では以下の $E_g = EA/A_g$ と等しく、他の Section では仮想断面のヤング係数 E_{Imag} に等しい。	$E = EA/A$
EI	曲げ剛性。	EI
E_g	EA を g Section の A で除した値。混合則に基づくヤング係数となる。	$E_g = EA/A_g$
$\rho_m g$	w を g Section の A で除した値。単位体積重量の平均値。	$\rho_m g = w/A_g$

5) 断面諸量の用途

1: Before の方法による計算結果は、以下のような目的で使用されます。2: After および 3: Skimp の方法による計算結果は、後の計算には使用されません。3: Skimp の方法による計算結果は、手計算による検算と照合するために使用するほか、簡易計算がどの程度の精度を持っているかを確かめるとよいでしょう。

表 34 断面諸量の用途

断面の種類	断面諸量	計算プロセス	用 途
g Section	計算中には使用しません。		E_g や ρ_m が参照できます。
c Section	計算中には使用しません。		—
d Section	EA	載荷前の計算 3.2 (b) 1)	Solid 上縁 Strain 増分(1-1)を求めるための初期値としての P/EA の計算に使用
	$EZ' = EI/y'$		Solid 上縁 Strain 増分(1-2)を求めるための初期値としての $-M/EZ'$ の計算に使用
	y'		計算上の中立軸(1)を求めるための初期値
d Section	EA	載荷前の計算 3.2 (b) 2)	Solid 上縁 Strain 増分(2-1)を求めるための初期値としての P/EA の計算に使用
	$EZ' = EI/y'$		Solid 上縁 Strain 増分(2-2)を求めるための初期値としての $-M/EZ'$ の計算に使用
	y'		計算上の中立軸(2)を求めるための初期値
e Section	EA	載荷前の計算 3.2 (b) 3)	Solid 上縁 Strain 増分(3-1)を求めるための初期値としての P/EA の計算に使用
	$EZ' = EI/y'$		Solid 上縁 Strain 増分(3-2)を求めるための初期値としての $-M/EZ'$ の計算に使用
	y'		計算上の中立軸(3)を求めるための初期値

(c) Table—Solid、Table—Bar、Table—PreTendon、Table—PosTendon、Table—External

断面要素の Strain、Stress、Force に関する情報を表示します。

- 計算中に変化するのは Strain、Stress、Force のみです。
- Table—External では Force、Moment が表示されますが、これらは定数として与えるものですから、計算の段階が変われば変化しますが、他の Table とは異なり収束計算によって変化するものではありません。

表 35 Table 中の Total、Loading、PreLoading

種 類	説 明
Total	Introduction 値も含む絶対値。
Loading	載荷前の計算および載荷の計算の各段階における、1 つ前の段階での値からの増分。
PreLoading	1 つ前の段階での値。載荷前の計算の最終結果を表示しており、載荷の計算では変化しません。

5.3 File

(a) File—Solver

Table—Solverと同じく、mfai.exeの主たる計算の結果です。File—Solverの出力は、入力ファイル名に.txtを付けたファイル(入力ファイルと同じフォルダ内)に対して行われます。

- 例えば、sample.inpという名前の入力ファイルの場合、同じフォルダ内のsample.inp.txtに出力されます。
- 既に存在する場合は、上書きするかどうか聞いてきます。
- このファイルはTAB区切りなので、表計算ソフトなどに簡単に取り込めます。

5.4 Tool Bar

(a) Step

Tool—Option の Calculation で設定されている、Scheme における曲率増分(4)の Range、あるいは、Scheme とは別に設定できる曲率増分(4)のピッチが表示されます。曲率増分(4)のピッチは、計算中でも変更することができます。

- 計算中に選択あるいは設定しようとする、自動的に Pause がかかります。

5.5 Status Bar

(a) Beam Top、Beam Bottom、Beam Height

Beam Top と Beam Bottom は、それぞれ最も Depth が小さいまたは大きい断面要素の Depth と Height の 1/2 あるいは Diameter の 1/2 を用い、規準となる座標軸 (X 軸)からの距離として求められる数値です。

また、Beam Height = Beam Bottom–Beam Top であり、いわゆる部材高さになります。

- mfai.exeでは、Beam Topを上縁と呼んでいます。ただし、上縁にある断面要素はSolidとは限りません。
- Beam Top が 0 である必要はありませんが、0 とすると分かりやすくなります。その場合は、Beam Bottom が部材高さになります。
- Beam Top を 0 にしない場合も、曲げモーメントはあくまで断面の図心回りの回転を引き起こします。

(b) Calculation、Status

mfai.exeの現在の状況や、何を計算しているかが表示されます。

表 36 Status Bar—Calculation、Status

Calculation		Status	
表示文字列	説 明	表示文字列	説 明
Edit	計算なし(編集)	Idle	指示待ち中
Initial	Introduction Strain の処理中	Start	処理中
Solid/Bar/PreTendon	Solid/Bar/PreTendon の処理中	End	処理終了
PosTendon	PosTendon の処理中	Pause	Pause 中
External	External の処理中	Watch	Watch による Pause 中
Loading (Dead)	Loading (自重)の処理中	Live	Live による Pause 中
Loading (Dead + Live)	Loading (自重 + 活荷重)の処理中		

計算の順番に書くと、以下ようになります。目視で確認できないほどほんの一瞬しか表示されないものもあります。

表 37 Status Bar—Calculation、Status の推移

操作等	Calculation	Status	収束計算	説 明
—	Edit	Idle	—	編集・指示待ち中
File—Start	Calculation	Start	—	計算の開始
File— Pause ↓ Status が Pause Watch が 設定 ↓ Status が Watch	—	—	—	この段階の開始
	Initial ¹ ↓ Solid/Bar/PreTendon ↓ PosTendon ↓ External	Start (N)	○ ²⁻¹	軸力の釣合いの 収束計算が開始
		End (N)		終了
		Start (MM)	○ ²⁻²	曲げモーメントの釣合いの 収束計算(外周)が開始
		Start (MN)		軸力の釣合いの 収束計算(内周)が開始
		End (MN/MM)		終了
		End (N), (MN/MM)	—	この段階の終了
	—	—	—	載荷の開始
	Loading (Dead)	Start	4-1	自重の載荷中
	Loading(Dead + Live)	Live	4-2 4-3	活荷重の載荷の開始に 伴う Pause
	Loading(Dead + Live)	Start	4-4	活荷重の載荷中
File—End	—	—	—	載荷の終了
—	—	—	—	計算の終了
—	Edit	Idle	—	編集・指示待ち中

1 Initial では収束計算は行いませんが、他の 3 段階と同様のメッセージを出し、また Pause in PreLoading で Pause するようにしています。

2 載荷前の計算における、各段階の番号です。3.2 (b) に示すように、Solid/Bar/PreTendon、PosTendon、External の順で、段階 1、段階 2、段階 3 となります。この意味では、Initial は段階 0 と呼ぶこともできます。

(c) Iteration

収束計算における繰返し回数が表示されます。

- 軸力と曲げモーメントの釣合いについて 2 重の収束計算が行われる場合は、軸力の釣合いの収束計算(内周)の繰返し回数 MN と、曲げモーメントの釣合いの収束計算(外周)の繰返し回数 MM が、MN/MM というフォーマットで表示されます。
- 計算中に、Pause しているのでもないのに、一見したところ画面が動いていないように感じたら、この Count の動きを見てください。Count も停止しているようなら、mfai.exe がハングアップした可能性があります。

(d) Iteration Max.

収束計算における最大の繰返し回数が表示されます。Tool—Option の Calculation の Iterations で与えます。詳細は 4.4 (a) 2) を参照。

(e) Diff1、Diff2

収束判定のために比較する 2 つの数値が表示されます。詳細は 4.4 (a) 2) や 3.3 (f) の表 12 を参照。

(f) Moment–Total Max.

M_{Total} の最大値。計算中に徐々に変化し、それまでの最大値が表示されます。

- M_{Total} や P_{Live} の最大値は、計算された Moment–Curvature 関係や Load–Displacement 関係から、容易に検索することができます。しかし、塑性変形を伴う場合は、 M_{Total} や P_{Live} の最大値付近では傾きが小さくなり、Moment や Load の変化に対して Curvature や Displacement の変化が大きいことを考慮する必要があります。すなわち、 M_{Total} や P_{Live} の最大値を検索する際には、そのときの Curvature や Displacement の値も併せて認識しておく必要があります。このため、Chart — Moment–Curvature や Chart — Load–Displacement では、 M_{Total} や P_{Live} の最大値において ● を表示するようにしています。

添付サンプルの実行例

作成予定。

1. sample.inp の読み込み

Add Object Wizard の実行例

作成予定。

1. Solid の作成
