

# 多直線近似法による 引張軟化曲線の推定マニュアル

日本コンクリート工学協会  
コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会

# 目次

1. 適用範囲	1
2. 解析対象	1
3. 推定プログラムの構成	1
4. 単位	1
5. 荷重 - 変位関係の計測データ	1
6. 配列寸法の固定	1
7. コンパイル時の注意点	1
8. ヤング係数の推定	2
9. 各プログラムの操作手順	3
9.1 ひび割れ方程式の係数算出プログラム (ini.for)	3
(1) 操作手順	3
(2) 作成されるファイル	3
9.2 ヤング係数推定プログラム (ym.for)	4
(1) 操作手順	4
(2) ヤング係数の決定	6
9.3 引張強度推定プログラム (ft.for)	7
(1) 操作手順	7
(2) 作成されるファイル	10
(3) 引張強度の判定	10
9.4 多直線近似解析法による引張軟化曲線推定プログラム (soft.for)	11
(1) 操作手順	11
(2) 作成されるファイル	14
9.5 荷重 - 変位関係の解析プログラム (pd.for)	15
(1) 操作手順	15
(2) 作成されるファイル	16
10. 実施例	17
10.1 普通コンクリート	17
付属資料	18
[1] 計測データ	18
[2] 引張強度の推定結果	19
[3] 引張軟化曲線の推定結果	20
[4] 荷重 - 変位関係の解析結果	21
[5] 要素データ	22

## 1. 適用範囲

この推定法は、既知の荷重 - 変位関係に対して引張軟化曲線を求めるものである。

## 2. 解析対象

解析対象は、平面応力状態で供試体形状ならびに荷重条件が左右対称のものとする。すなわち、ひび割れは対称軸線に沿って進展するものとする。なお、荷重点は1点で1方向のみとする。

## 3. 推定プログラムの構成

推定プログラムは、以下の5つのプログラムから成り、すべてFORTRANにより作成されている。引張軟化曲線は、5つのプログラムを順次実行させることで得ることができる。

ini.for	.....	ひび割れ方程式の係数を求めるプログラム
ym.for	.....	ヤング係数を推定するプログラム
ft.for	.....	引張強度を推定するプログラム
soft.for	.....	引張軟化曲線を求めるプログラム
pd.for	.....	荷重 - 変位関係を解析するプログラム

## 4. 単位

プログラム中の各数値の単位は、以下のように統一している。

荷重	N
変位・寸法	mm
応力	N/mm <sup>2</sup>

## 5. 荷重 - 変位関係の計測データ

荷重 - 変位関係の計測データは、荷重、変位の順に記述し、そのFORMATは(2F10.0)とする。

## 6. 配列寸法の固定

一連のプログラムでは一部、配列寸法を固定してあるので、以下の制限がある。(変更は可能である。各プログラム中の該当する数値を変更すれば良い。)

- ・ ひびわれ節点数は100以下
- ・ 支点の数は100以下
- ・ 実験データの数は2000以下

## 7. コンパイル時の注意点

3.に記載した各プログラムをコンパイル(実行ファイルを作成)する場合、プログラムのメインの部分で指定されているPARAMETER ( )内の各数値を要素データに

一致させる必要がある。

## 8. ヤング係数の推定

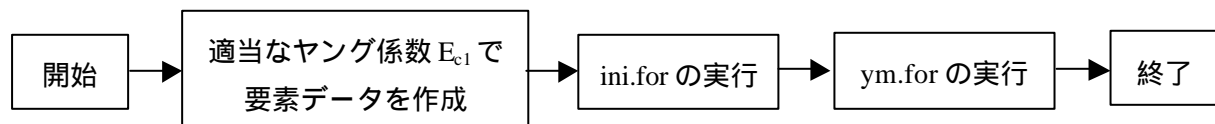
本プログラムを用いて引張軟化曲線を推定する場合、ヤング係数の入力が必要となる。ヤング係数は、通常、圧縮供試体により実験的に求められるが、その実験値を入力した場合、解析で得られるはり供試体の荷重 - 変位関係の初期勾配と計測された荷重 - 変位関係の初期勾配との間に差が生じる場合がある。これは解析の誤差および実験の計測精度に起因するものである。そのために、引張軟化曲線を推定する以前に、ini.for（ひび割れ方程式の係数を求めるプログラム）および ym.for（ヤング係数を推定するプログラム）を用いてヤング係数の推定を行う。

ここでは、解析で得られるひび割れ発生荷重点までの勾配を計測された荷重 - 変位関係の勾配と一致するようにヤング係数を推定する。具体的には、解析におけるひび割れ発生荷重点が計測された荷重 - 変位関係上に乗るように推定を行う。

ヤング係数推定のための作業フローを示す。適当にヤング係数 ( $E_{c1}$ ) で要素データファイルを作成し、荷重 - 変位関係を解析する (ini.for ym.for)。ym.for では、ひび割れ発生点での荷重 ( $P_{cr}$ ) と変位 ( $d_{cr}$ ) の計算をするとともに、荷重 ( $P_{cr}$ ) における実験での変位 ( $d_e$ ) を求めている。次式のより、ヤング係数 ( $E_{c2}$ ) が推定される。

$$E_{c2} = E_{c1} \times \frac{d_{cr}}{d_e}$$

ym.for を実行する際、コンクリートの引張強度が必要となるが、この引張強度は必ずしも厳密である必要はなく、割裂引張強度が分かっているならば、それを入力すれば良く、分からなければ圧縮強度の 1/10 程度の値を入力すれば良い。引張軟化曲線推定時の許容誤差を極端に小さくしない限り、結果に大きな影響はないものとする。



## 9. 各プログラムの操作手順

### 9.1 ひび割れ方程式の係数算出プログラム (ini.for)

このプログラムではひびわれ方程式の係数がファイルに出力され、以下のすべてのプログラムで参照される（計算時間短縮のポイント）。なお、要素データが変更されなければ、以後、実行する必要はない。

#### (1) 操作手順

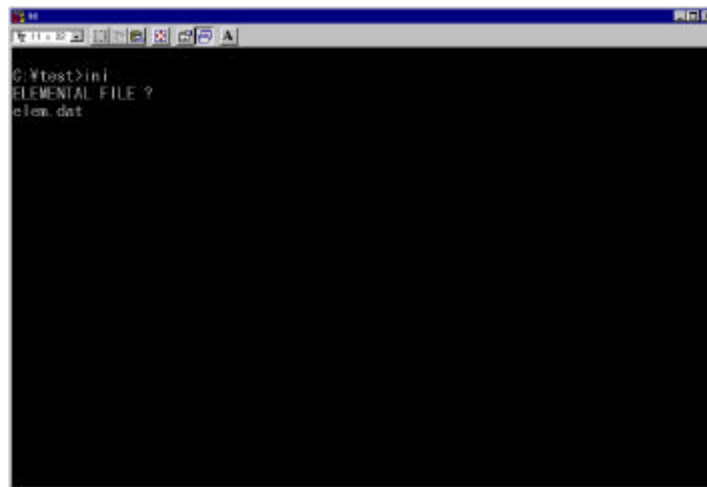
手順	入力項目	作成されるファイル
1	要素データファイル名 (例：elem.dat)	
		elem.tmp

#### 手順 1. 要素データファイルの入力

[ELEMENTAL FILE ?]

要素データファイル名（例：elem.dat）を入力する。

\* 要素データの作成については、付属資料[5]を参照のこと。



#### (2) 作成されるファイル

ひび割れ方程式の係数が出力されたファイル(elem.tmp)が1つ作成される。このファイルは、UNFORMAT形式で出力され、以下のすべてのプログラムで参照される。

## 9.2 ヤング係数推定プログラム (ym.for)

このプログラムは、解析におけるひび割れ発生荷重点までの勾配が計測された荷重 - 変位関係の勾配と一致するようにヤング係数を推定するプログラムである。

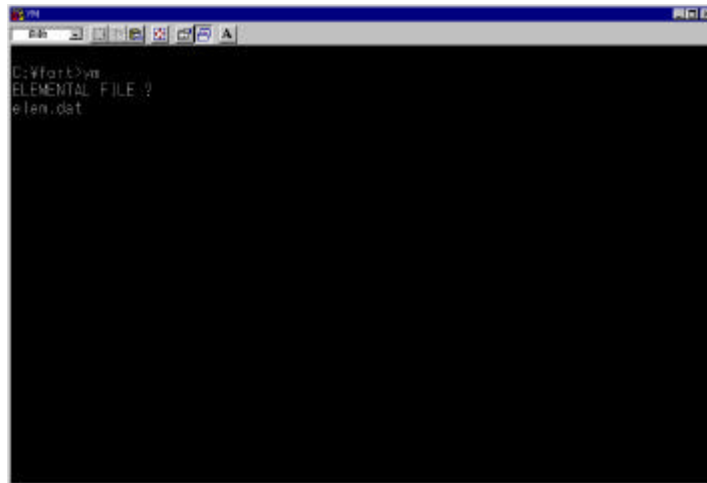
### (1) 操作手順

手順	入力項目	作成されるファイル
1	要素データファイル名 (例: elem.dat)	
2	計測データファイル名 (例: exp.dat)	
3	計測データの種類 (変位 1、CMOD 2)	
4	引張強度の入力	

#### 手順 1. 要素データファイル名の入力

[ELEMENTAL FILE ?]

要素データファイル名 (例: elem.dat) を入力する。



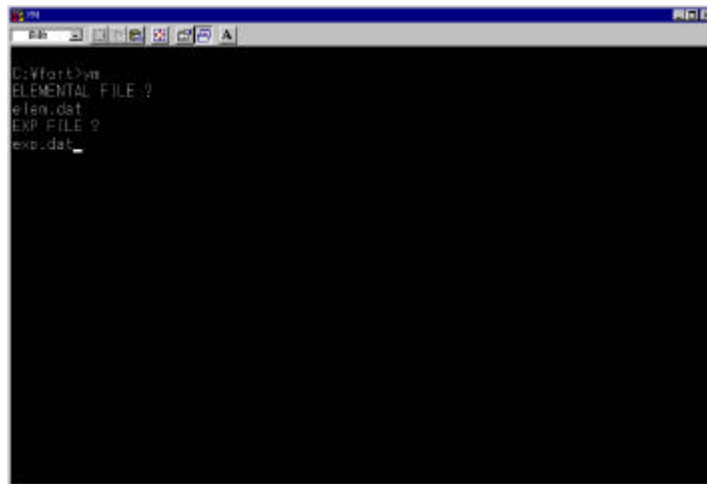
#### 手順 2. 計測データのファイル名の入力

[EXP FILE ?]

計測データのファイル名 (例: exp.dat) を入力する。

\* 計測データの FORMAT は (2F10.0) とする。

\* ファイルの第一行目には、計測データの説明文 (例: exp.dat、等) を必ず記述しておく (付属資料[1]参照)。この説明文は、以後の解析結果を出力するファイルに自動的に記述される。

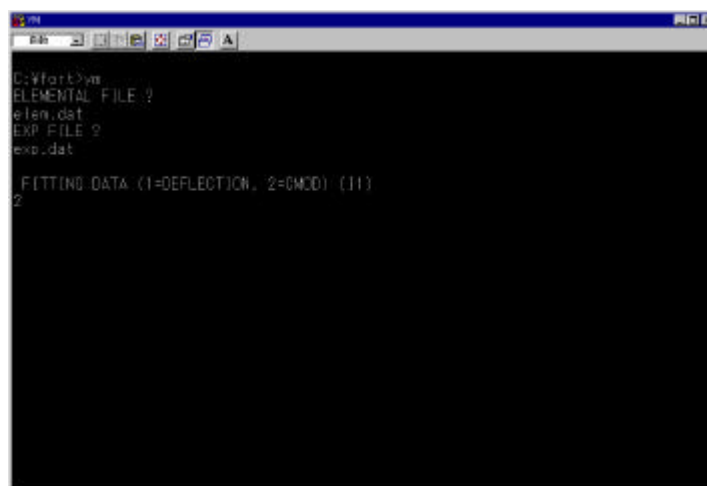


```
C:\fort>
ELEMENTAL FILE ?
elem.dat
EXP FILE ?
exp.dat
```

手順 3. FITTING DATA の種類の選択

[FITTING DATA (1=DEFLECTION, 2=CMOD) (11)]

どの種類の計測データなのかを選択する。変位の場合は 1 を、CMOD の場合は 2 を選択する（例：2）。



```
C:\fort>
ELEMENTAL FILE ?
elem.dat
EXP FILE ?
exp.dat

FITTING DATA (1=DEFLECTION, 2=CMOD) (11)
2
```

手順 5. 引張強度の入力

[TENSILE STRENGTH (F10.0)]

引張強度を入力する。この引張強度は必ずしも厳密である必要はなく、割裂引張強度が分かっているならば、それを入力すれば良く、分からなければ圧縮強度の 1/10 程度の値を入力すれば良い（例：3.）。

```
C:\fort>ym
ELEMENTAL FILE ?
e1en.dat
EXP FILE ?
exp.dat

FITTING DATA (1=DEFLECTION, 2=CMOD) (11)
2

TENSILE STRENGTH (F10..0)
?
```

## (2) ヤング係数の決定

ym.for を実行すると、'CORRECTED YM ='として推定されたヤング係数が表示される。

後に、要素データファイルのヤング係数を、この推定されたヤング係数に修正して、引張軟化曲線の推定作業に移る。



### 9.3 引張強度推定プログラム (ft.for)

完全塑性型の引張軟化曲線を仮定し，引張強度を変化させて，実験値との一致具合を出力する。

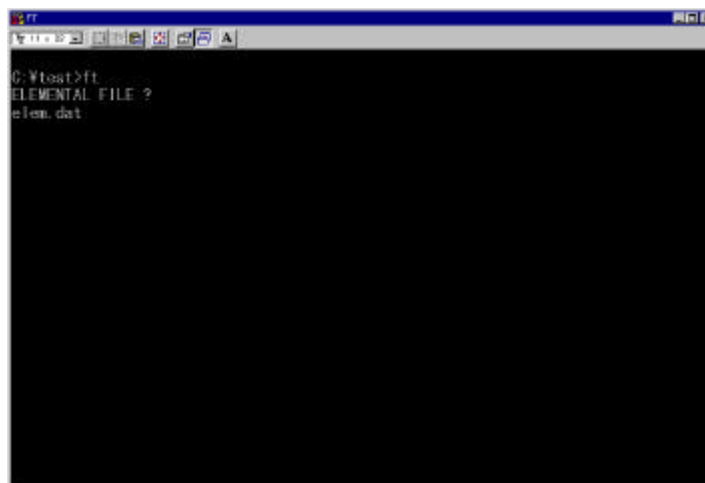
#### (1) 操作手順

手順	入力項目	作成されるファイル
1	要素データファイル名 (例：elem.dat)	
2	出力ファイル名 (例：exp.ft)	
3	計測データファイル名 (例：exp.dat)	
4	計測データの種類 (変位 1、CMOD 2)	
5	許容誤差	
6	引張強度の下限值	
7	引張強度の上限値	
		(例：exp.ft)

#### 手順 1. 要素データファイルの入力

[ELEMENTAL FILE ?]

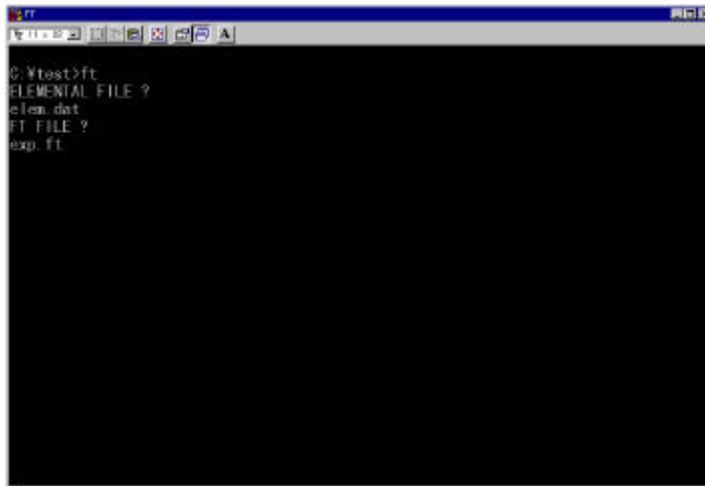
要素データファイル名 (例：elem.dat) を入力する。



#### 手順 2. 引張強度推定結果を出力するファイルの入力

[FT FILE ?]

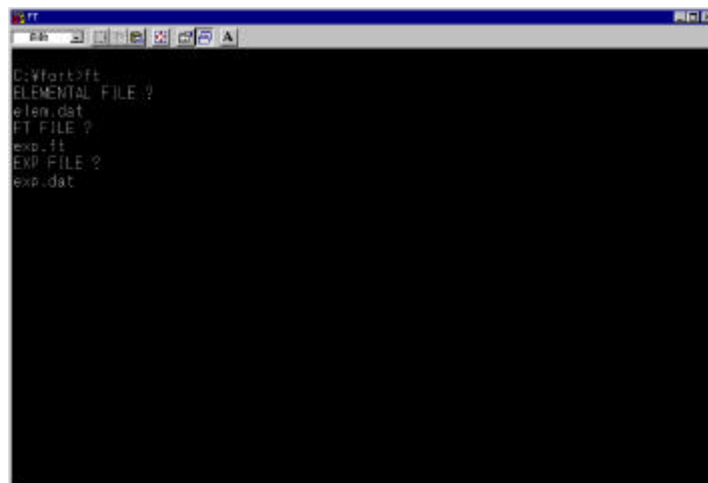
引張強度の推定結果を出力するファイル名 (例：exp.ft) を入力する。



手順 3. 計測データのファイルの入力

[EXP FILE ?]

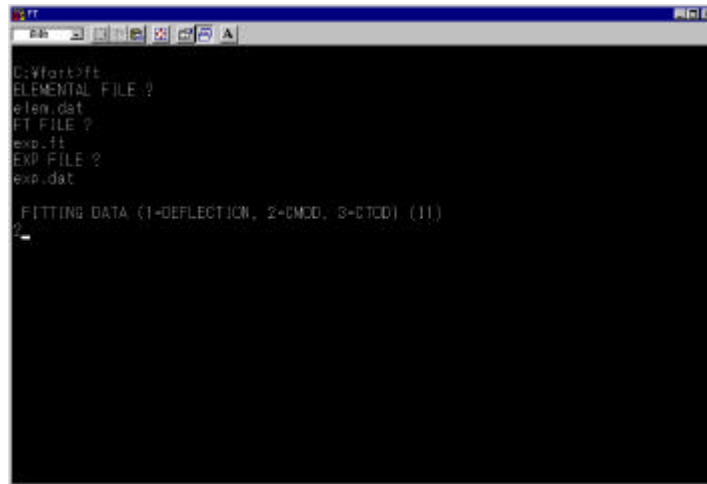
計測データのファイル名（例：exp.dat）を入力する。



手順 4. FITTING DATA の種類の選択

[FITTING DATA (1=DEFLECTION, 2=CMOD) (11)]

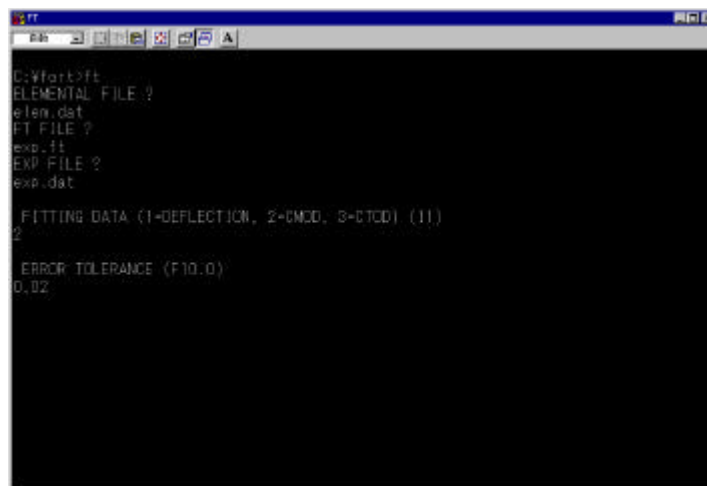
どの種類の計測データなのかを選択する。変位の場合は 1 を、CMOD の場合は 2 を選択する（例：2）。



手順 5. 許容誤差の入力

[ERROR TOLERANCE (F10.0)]

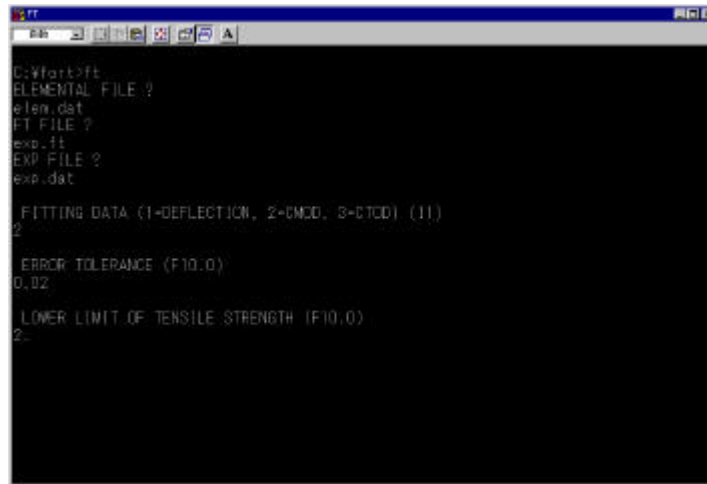
引張強度推定時の許容誤差を入力する（例：0.02）。誤差は、同一変位における荷重差で表される。1%の許容誤差とするなら、0.01 を入力する。



手順 6. 引張強度の下限値の入力

[LOWER LIMIT OF TENSILE STRENGTH (F10.0)]

引張強度を変化させる範囲の下限値を入力する（例：2.）。



```
D:\fort>ft
ELEMENTAL FILE ?
elem.dat
FT FILE ?
exp.ft
EXP FILE ?
exp.dat

FITTING DATA (1-DEFLECTION, 2-CMCD, 3-CTOD) (11)
2

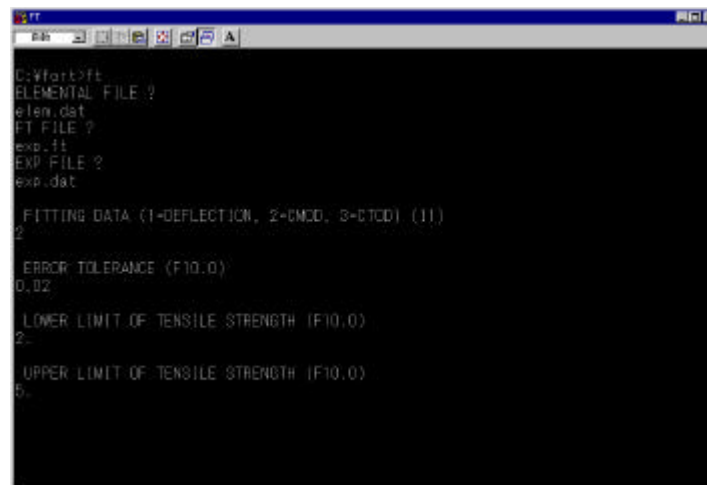
ERROR TOLERANCE (F10.0)
0.02

LOWER LIMIT OF TENSILE STRENGTH (F10.0)
2.
```

### 手順 7. 引張強度の上限値の入力

[UPPER LIMIT OF TENSILE STRENGTH (F10.0)]

引張強度を変化させる範囲の上限値を入力する（例：5.）。



```
D:\fort>ft
ELEMENTAL FILE ?
elem.dat
FT FILE ?
exp.ft
EXP FILE ?
exp.dat

FITTING DATA (1-DEFLECTION, 2-CMCD, 3-CTOD) (11)
2

ERROR TOLERANCE (F10.0)
0.02

LOWER LIMIT OF TENSILE STRENGTH (F10.0)
2.

UPPER LIMIT OF TENSILE STRENGTH (F10.0)
5.
```

### (2) 作成されるファイル

作成されるファイルは、手順 2. で指定した出力ファイル 1 つのみである。ここには、以下のものが出力される。付属資料[2] 参照。

#### ・引張強度の推定結果

{{番号(No.)、引張強度(Ft)、許容誤差内と判断されたひび割れ進展数(ICR)、CTOD、誤差(ERROR)}の順位に出力。

### (3) 引張強度の判定

8.3(2)において、出力された結果から ICR が最も大きかった FT を選択する。ICR が最も大きい FT が複数個ある場合は、CTOD が最も大きいものを選ぶ。

#### 8.4 多直線近似法による引張軟化曲線推定プログラム (soft.for)

このプログラムは、多直線近似法により引張軟化曲線を推定プログラムである。上述の引張強度の推定結果を用いる。

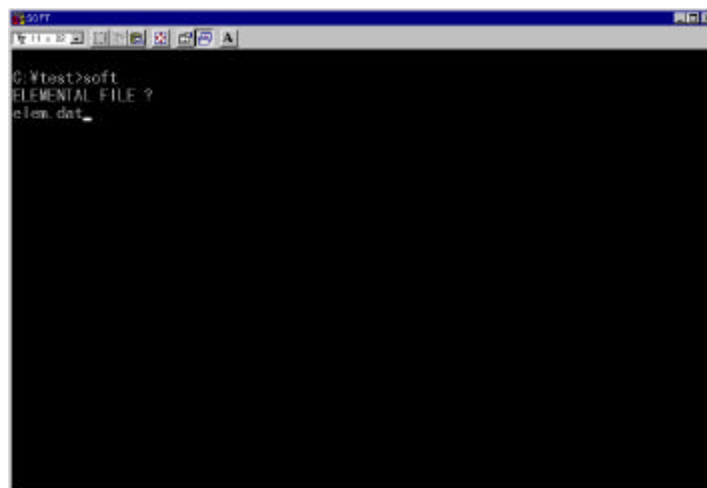
##### (1) 操作手順

手順	入力項目	作成されるファイル
1	要素データファイル名 (例: elem.dat)	
2	出力ファイル名 (例: exp.sof)	
3	計測データファイル名 (例: exp.dat)	
4	計測データの種類 (変位 1、CMOD 2)	
5	許容誤差	
6	引張強度	
		(例: exp.sof)

##### 手順 1. 要素データファイルの入力

[ELEMENTAL FILE ?]

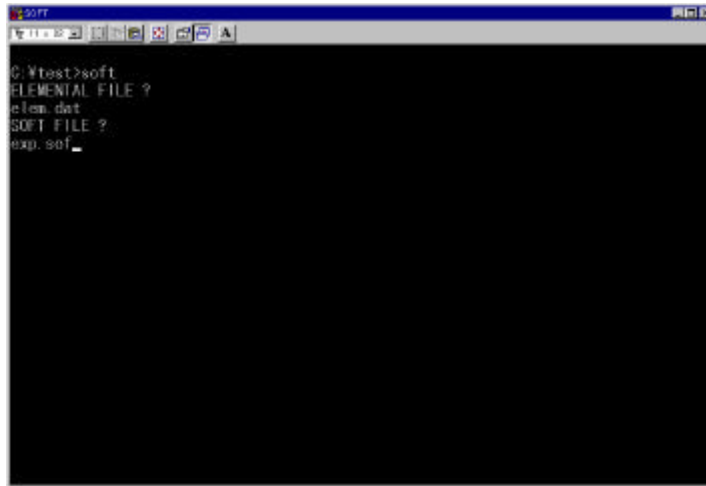
要素データファイル名 (例: elem.dat) を入力する。



##### 手順 2. 引張軟化曲線の推定結果を出力するファイル名の入力

[SOFT FILE ?]

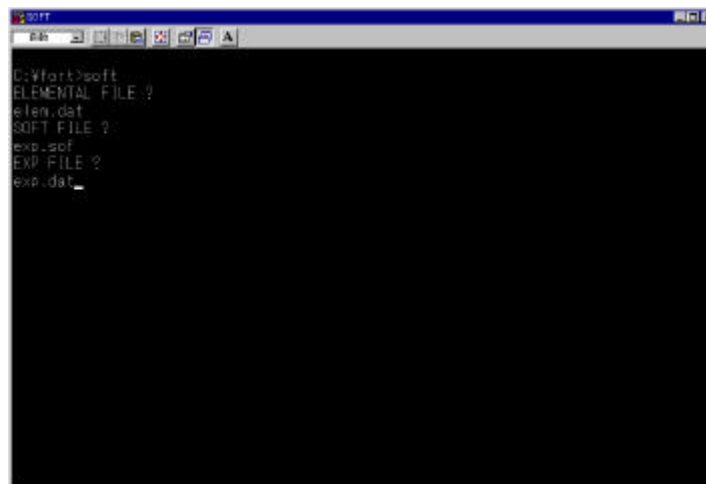
引張軟化曲線の推定結果を出力するファイル名 (例: exp.sof) を入力する。



手順 3. 計測データのファイルの入力

[EXP FILE ?]

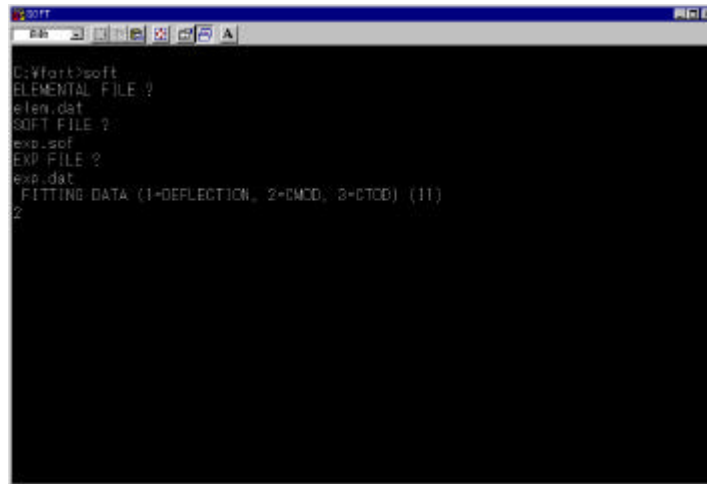
計測データのファイル名（例：exp.dat）を入力する。



手順 4. FITTING DATA の種類の選択

[FITTING DATA (1=DEFLECTION, 2=CMOD, 3=CTOD) (11)]

どの種類の計測データなのかを選択する。変位の場合は 1 を、CMOD の場合は 2 を、CTOD の場合は 3 を選択（例：2）。

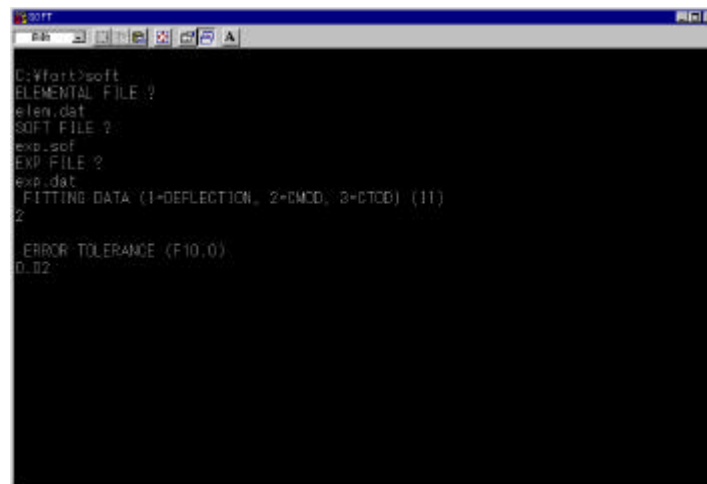


```
C:\fort>soft
ELEMENTAL FILE ?
elen.dat
SOFT FILE ?
exp sof
EXP FILE ?
exp.dat
FITTING DATA (1=DEFLECTION, 2=DMCD, 3=CTCD) (11)
2
```

#### 手順 5. 許容誤差の入力

[ERROR TOLERANCE (F10.0)]

引張軟化曲線推定時の許容誤差（同一変位における荷重差、1%なら0.01と入力）を入力する（例：0.02）。引張強度推定時の許容誤差と必ずしも同一でなくても良い。この場合は、ft.forで仮定した完全塑性型の設定は無視される。つまり、引張軟化曲線の第2点目から曲線の勾配を仮定して推定が進む。



```
C:\fort>soft
ELEMENTAL FILE ?
elen.dat
SOFT FILE ?
exp sof
EXP FILE ?
exp.dat
FITTING DATA (1=DEFLECTION, 2=DMCD, 3=CTCD) (11)
2
ERROR TOLERANCE (F10.0)
0.02
```

#### 手順 6. 引張強度の入力

[TENSILE STRENGTH (F10.0)]

引張強度を入力する。引張強度推定プログラムの結果を参考にして適切な数値を入力する（例：3.9）。

```
C:\fort>sftt
ELEMENTAL FILE ?
elen.dat
SOFT FILE ?
exp.sof
EXP FILE ?
exp.dat
FITTING DATA (1-DEFLECTION, 2-CMCD, 3-CTCB) (11)
2
ERROR TOLERANCE (F10.0)
0.02
TENSILE STRENGTH (F10.0)
8.0
```

## (2) 作成されるファイル

作成されるファイルは、上述の手順 2 で指定した出力ファイル 1 つのみである。ここには、以下のものが出力される。付属資料[3]参照。

- ・ 解析条件等 (要素データ名、実験データ名、等のコメント文)
- ・ 引張軟化曲線  
{番号、引張応力(N/mm<sup>2</sup>)、ひび割れ幅(mm)}の順位に出力。



## 8.5 荷重 - 変位関係の解析プログラム (pd.for)

このプログラムは、多直線近似法により推定された引張軟化曲線を用いて荷重 - 変位関係を解析するプログラムである。

### (1) 操作手順

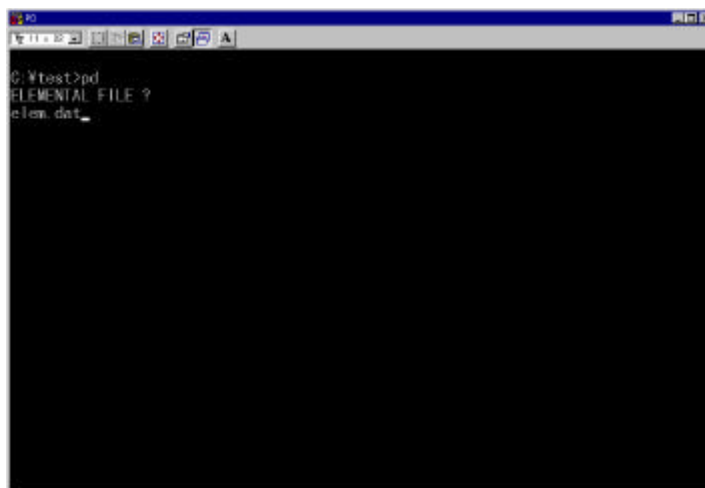
手順	入力項目	作成されるファイル
1	要素データファイル名 (例: new-elem.dat)	
2	出力ファイル名 (例: exp.pd)	
3	引張軟化曲線のファイル名 (例: exp.sof)	
		(例: exp.pd)

#### 手順 1. 要素データファイルの入力

[ELEMENTAL FILE ?]

要素データファイル名 (例: elem.dat) を入力する。

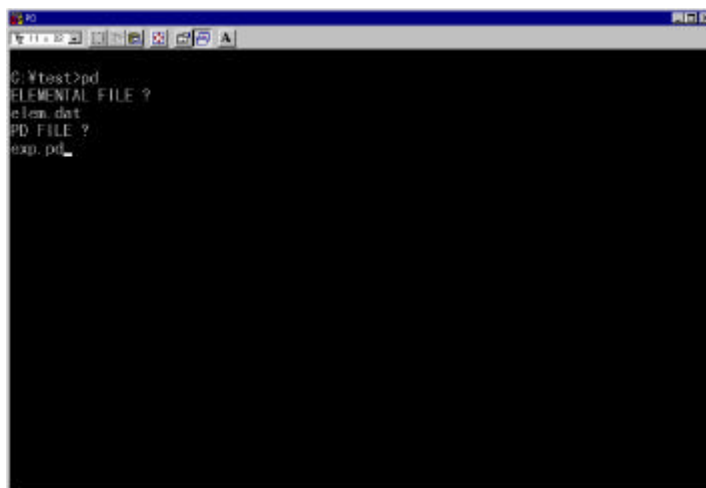
供試体形状やヤング係数等が異なる他の供試体を対象とする場合は、ここで、それに応じた要素データファイル名を入力する。その際、その要素データにより ini.for を動作させておく必要がある。



#### 手順 2. 荷重 - 変位関係の解析結果を出力するファイルの入力

[PD FILE ?]

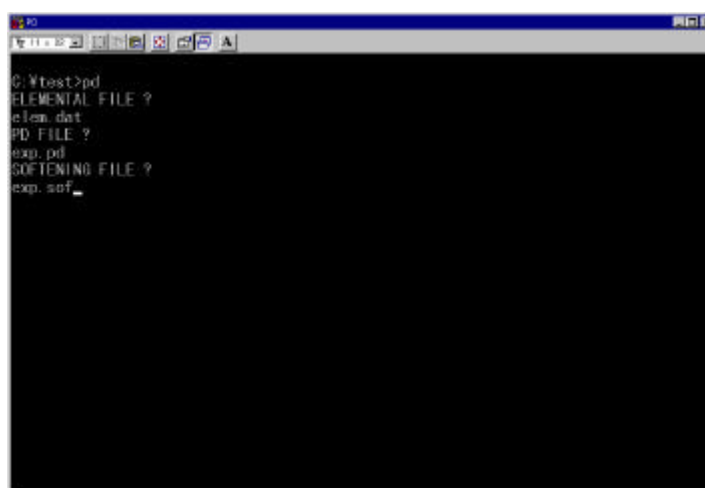
荷重 - 変位関係の解析結果を出力するファイル名 (例: exp.pd) を入力する。



### 手順 3. 引張軟化曲線のファイルの入力

[SOFTENING FILE ?]

引張軟化曲線のファイル名（例：exp.sof）を入力する。



#### (2) 作成されるファイル

作成されるファイルは、上述の手順 2 で指定した出力ファイル 1 つのみである。ここには、以下のものが出力される。付属資料[4]参照。

- ・荷重 - 変位関係{番号、荷重(N)、変形(mm)、CMOD(mm)、CTOD(mm)}の順位に出力。要素データファイル内で指定した変形、CMOD、CTODを計算する節点番号の変位を荷重とともに出力する。

なお、soft.for で出力されるファイルと同じ形式（コメント行も必要）の引張軟化曲線のファイルを用意すれば、ini.for、pd.for を用いて、任意の引張軟化曲線について荷重 - 変形関係を求めることが可能である。

## 10. 実施例

### 10.1 普通コンクリート

#### 実験概要：

普通コンクリートにより作製したはり供試体を3等分点曲げ載荷した。コンクリートの示方配合は、表 - 1 に示す通りである。

表 - 1 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	S	G	AE 減水剤	補助 AE 剤
55	47	157	286	836	984	0.715	0.03

#### コンクリートの材料特性：

- ・圧縮強度 35.3 N/mm<sup>2</sup>
- ・割裂引張強度 3.53 N/mm<sup>2</sup>
- ・ヤング係数  $3.29 \times 10^4$  N/mm<sup>2</sup>

#### 供試体形状：

- ・幅 100 mm
- ・はり高さ 100 mm
- ・スパン 300 mm
- ・切欠き深さ 38 mm
- ・自重 2.31

#### 解析結果：

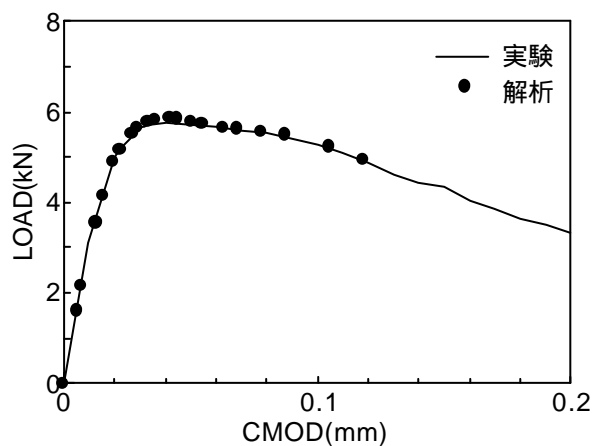


図 - 1 荷重 - CMOD 曲線

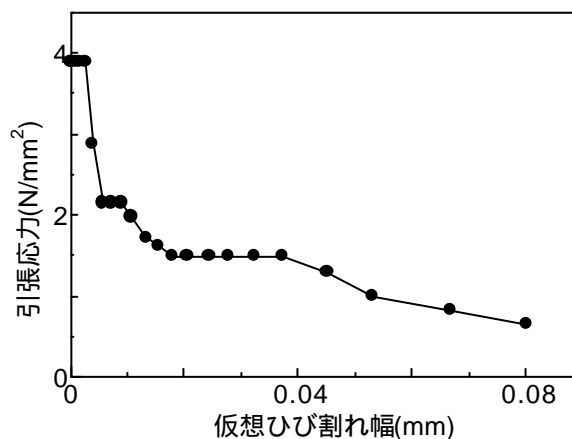


図 - 2 引張軟化曲線

付属資料

[1] 計測データ

```
exp.dat  ft=3.46
  0.00    0.000
3092.11   0.010
4976.61   0.020
5073.73   0.021
5140.44   0.022
5246.68   0.023
5288.28   0.024
5359.20   0.025
5404.62   0.026
5491.34   0.027
5562.27   0.028
5587.78   0.029
5612.30   0.030
5679.99   0.031
5687.84   0.032
5719.23   0.033
5736.89   0.034
5769.75   0.040
5727.47   0.050
5683.13   0.060
5601.31   0.070
5535.98   0.080
5394.81   0.090
5258.36   0.100
5083.93   0.110
4856.64   0.120
4613.64   0.130
4454.92   0.140
4362.02   0.150
```

中 略

```
1933.16   0.430
1885.97   0.440
1838.69   0.450
1791.50   0.460
1744.41   0.470
1697.72   0.480
1661.42   0.490
1636.31   0.500
1606.98   0.510
 817.07   0.720
 585.66   0.950
 563.09   1.050
 540.83   1.100
 373.37   1.650
 362.19   1.700
 352.08   1.750
 341.98   1.800
 331.77   1.850
 321.67   1.900
 315.78   1.950
 309.80   2.000
 302.34   2.050
 294.99   2.100
 221.02   4.100
```

[2] 引張強度の推定結果

FEM DATA = elem.dat  
 EXP DATA = exp.dat ft=3.46  
 FITTING DATA = 2  
 ERROR TOLERANCE = .020

:データ名(A5)

NO.	FT	ICR	CTOD	ERROR
1	2.0	2	.00076	-.0986
2	2.1	2	.00079	-.0986
3	2.2	2	.00083	-.0986
4	2.3	2	.00087	-.0986
5	2.4	2	.00091	-.0986
6	2.5	2	.00094	-.0986
7	2.6	2	.00098	-.0986
8	2.7	2	.00102	-.0986
9	2.8	2	.00106	-.0986
10	2.9	2	.00110	-.0986
11	3.0	2	.00113	-.0986
12	3.1	2	.00117	-.0942
13	3.2	2	.00121	-.0831
14	3.3	2	.00125	-.0724
15	3.4	2	.00129	-.0621
16	3.5	2	.00132	-.0522
17	3.6	2	.00136	-.0426
18	3.7	2	.00140	-.0334
19	3.8	2	.00144	-.0245
20	3.9	5	.00481	.0561
21	4.0	4	.00377	.0224
22	4.1	3	.00229	.0220
23	4.2	3	.00235	.0290
24	4.3	3	.00240	.0357
25	4.4	2	.00166	.0230
26	4.5	2	.00170	.0300
27	4.6	2	.00174	.0369
28	4.7	2	.00178	.0435
29	4.8	2	.00181	.0499
30	4.9	2	.00185	.0562

### [3] 引張軟化曲線の推定結果

FEM DATA = elem.dat  
EXP DATA = exp.dat ft=3.46  
FITTING DATA = 2  
ERROR TOLERANCE = .020

:データ名(A5)

CRACK WIDTH	STRESS
.00000	3.900
.00011	3.900
.00079	3.900
.00149	3.900
.00258	3.900
.00384	2.889
.00569	2.152
.00713	2.152
.00896	2.152
.01073	1.975
.01324	1.725
.01532	1.621
.01791	1.491
.02053	1.491
.02434	1.491
.02779	1.491
.03234	1.491
.03732	1.491
.04509	1.297
.05314	.995
.06680	.824
.08017	.657

[4] 荷重 - 変位関係の解析結果

FEM DATA = elem.dat			:データ名(A5)	
NO.	LOAD	DEFLECTION	CMOD	CTOD
0	.00	.00000	.00000	.00000
1	1602.12	.00588	.00518	.00000
2	2151.92	.00796	.00708	.00023
3	3551.17	.01379	.01274	.00147
4	4135.61	.01639	.01538	.00218
5	4882.97	.02029	.01970	.00382
6	5171.98	.02232	.02222	.00503
7	5513.75	.02572	.02688	.00742
8	5645.91	.02731	.02913	.00857
9	5785.71	.03004	.03328	.01082
10	5840.63	.03192	.03628	.01251
11	5870.89	.03529	.04189	.01572
12	5844.00	.03692	.04474	.01741
13	5783.71	.03985	.04999	.02049
14	5740.62	.04238	.05454	.02314
15	5648.39	.04706	.06311	.02815
16	5630.03	.05002	.06845	.03123
17	5547.54	.05517	.07806	.03689
18	5499.21	.06008	.08720	.04227
19	5231.40	.06884	.10441	.05280
20	4946.17	.07556	.11808	.06131

