

第4章 FEM（2次元）ひび割れ幅解析

4.1 温度ひび割れモデル

ひび割れ幅の解析方法は、CPひび割れ幅法とFEMひび割れ幅法の2種類がある。FEMひび割れ幅法は、温度ひび割れモデルとして、JCIマスコンクリートの温度応力研究委員会（以下、マスコン委員会）から提案されたモデルを採用している。本モデルは、図-4.1に示すように離散ひび割れモデルを基本とするものである。鉄筋とコンクリートの付着はひび割れ近傍一定区間に付着のない領域（付着喪失等価領域）を仮定することによりモデル化している。付着喪失等価領域の長さ l_s はひび割れ幅計算値および鉄筋応力に影響をおよぼすが、マスコン委員会では $l_s=15\sim 20\text{cm}$ を推奨している。温度ひび割れ幅解析モデルについての詳細はマスコン委員会報告書（温度応力ひび割れ幅算定方法についての提案, 1992年9月）を参照されたい。

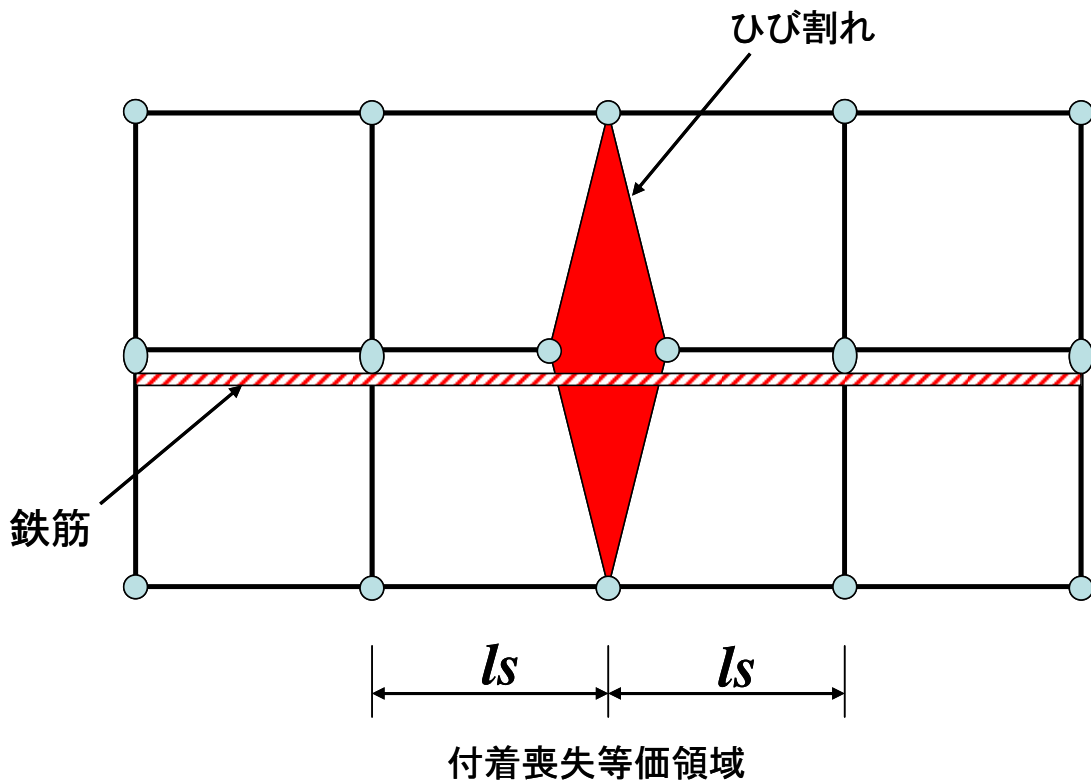


図-4.1 ひび割れ幅解析モデル

4.2 要素の再分割処理

一般に、離散ひび割れモデルでは、ひび割れを表現するために解析中に要素の再分割が必要となる。この処理を自動的に行うためには、やや複雑なアルゴリズムが必要となる。本プログラムでは処理の簡略化を計るため、次の様な手順を採用している。まず、ひび割れ発生位置をあらかじめ設定しておき、この位置に図-4.2に示すような二重節点を定義する。二重節点間は極めて大きな剛性を持つバネ要素で連結しておく。そして、ひび割れが発生すると判定された時点で節点間の連結を切り離してひび割れを表現する。ひび割れ幅は、ひび割れを挟む二つの

節点間の相対的変位差により算定する。以上の様な手順を採用することにより、計算処理全体が大きく簡略化される。ただし上の説明で明らかな様に、本プログラムでは解析を行うにあたり、対象とする構造物に発生するひび割れの位置と本数を、あらかじめ設定しておく必要があることに留意されたい。

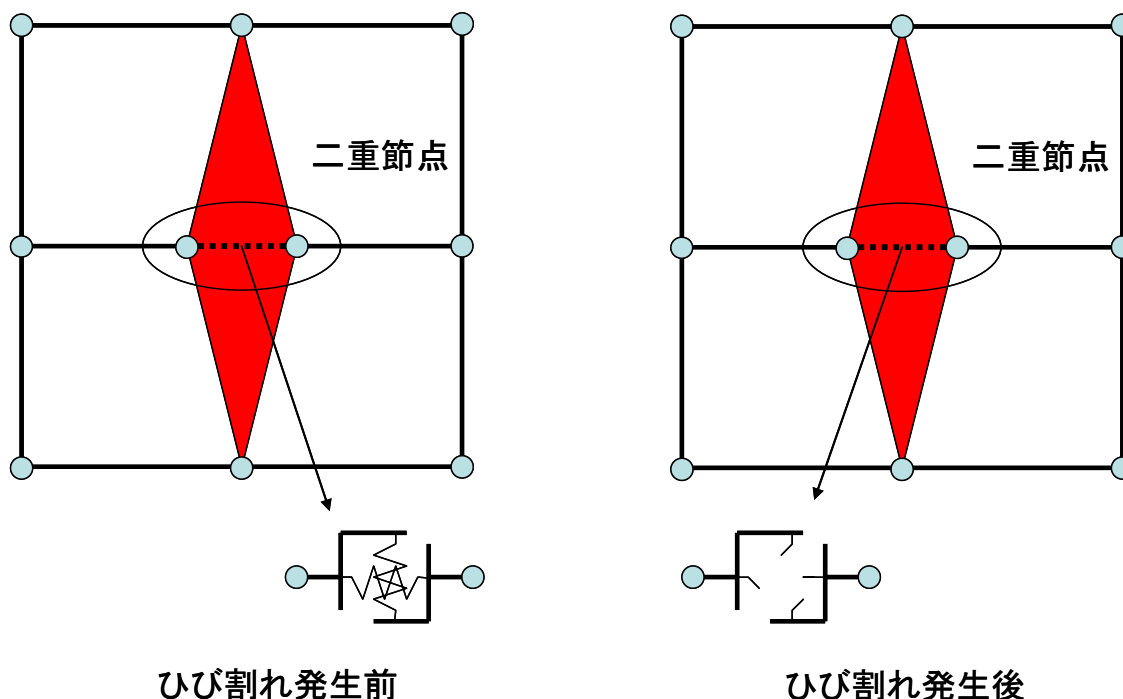


図-4.2 二重節点

4.3 データファイル

表-4.1 に本プログラムで使用する入出力用のデータファイルの一覧を示す。このうち、入力用ファイル *.tp は要素温度変化データを収納するファイルである。このファイルは、第2章で説明した温度解析プログラムを用いると自動的に生成される。また、入力用ファイル *.dt は解析時間ステップ毎の要素の温度変化が収納されている。壁体を対象とした二次元解析では、通常図-4.3 に示すように温度解析と応力解析の解析対象断面が相違する。このため、温度解析結果（要素温度変化データ *.tp ファイル）をそのままの形でひび割れ解析の入力データ（*.dt ファイル）として用いることができない。本プログラムでは温度解析で得られた結果を、ひび割れ解析用の入力データとして自動的に加工する機能を有している。すなわち、*.tp ファイルを読み込んで、*.dt ファイルを作成するものである。

*.dt ファイルを作成する際には次のような処理が行われる。

- ①壁の解析では、温度解析結果をもとにひび割れ解析断面に対する温度荷重データの作成を行う。スラブの解析では、温度解析断面とひび割れ解析断面が同一であるのでデータの変換は行わず、温度解析結果をそのままコピーする。
- ②壁、スラブとも、温度解析（通常、鉄筋は考慮しない）をもとにひび割れ解析で必要となる鉄筋要素の温度荷重データを作成し、*.dt ファイルに付け加える。

表-4.1 データファイル仕様

No.	ファイル名+内容識別子	ファイル内容	入出力
1	*.djk	解析条件データ	入力
2	*.ek	断面形状データ	入力
3	*.cns	基本データ	入力
4	*.nes	節点、要素データ	入力
5	*.em	弾性係数データ	入力
6	*.ten	引張強度データ	入力
7	*.po	ポアソン比、熱膨張係数データ	入力
8	*.dt	温度変化データ	入力
9	*.ti	ステップデータ	入力
10	*.tp	温度解析結果出力ファイル（温度変化データ作成用）	入力
11	*.out	解析結果の出力ファイル（応力、ひび割れ幅）	出力
12	*1.wj2	応力の解析結果（ $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ ）	出力

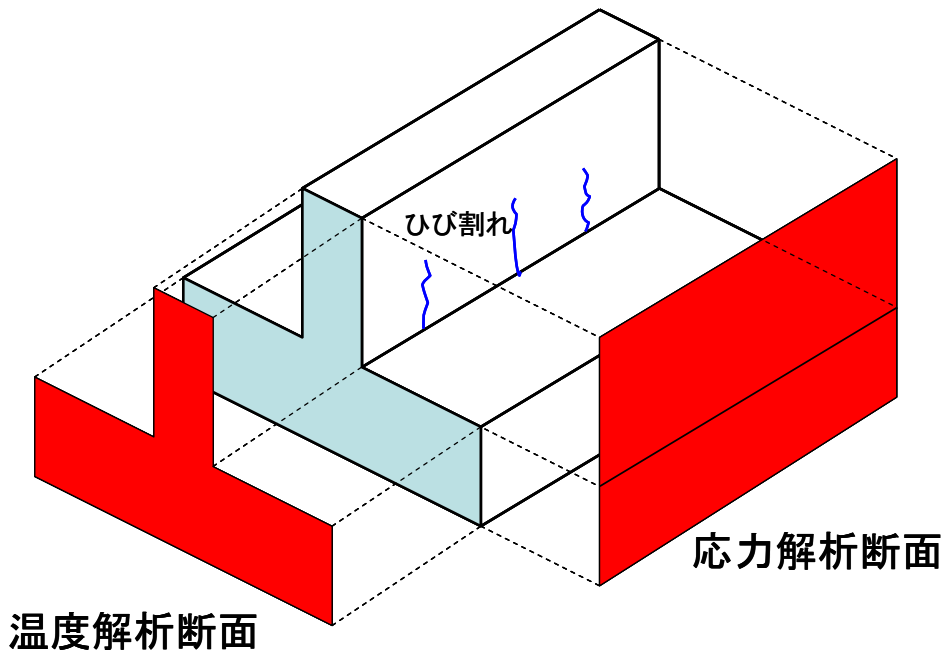


図-4.3 解析断面

ただし、本機能は付属の温度解析プログラムを用いた場合にのみ利用することができる。他の温度解析プログラムを用いる場合は、エディターあるいは表計算ソフトなどで温度解析結果をもとに *.dt ファイルを作成しなければならない。この際、上で説明したように鉄筋に対する温度荷重データを付け加えなければならないことに留意されたい。

以下に各入力ファイルの内容およびデータ Format を示す。

データファイル名	*. djk
I A, I B	Format (2I5)
ここで、I A : 平面ひずみ	0, 平面応力 1
I B : 温度	0, 外荷重 1

データファイル名	*. ek	
I A	Format (I5)	↓ (材料数行だけ必要)
B (1)	Format (F9.3)	
B (2)		
・		
・		
ここで、I A : 材料数	B (i) : 材料番号 i の要素の厚さ、ただし鉄筋要素は断面積、 バネ要素は 0.0 (ダミー値) を入力する。	

データファイル名	*. cns
入力データ自動作成プログラムが参照する各種パラメタの収納ファイル。 内容の説明は省略する。	

データファイル名	*. nes	
N, X, Y, I X 1, I X 2, I X 3, I Y 1, I Y 2, I Y 3, NN, I C, N 1, N 2, N 3, I I C, I C D, I C L	Format (I5, 2F9.3, 8I3, 3I5, 3I3)	↓ (みかけ節点数行だけ必要)
・		
・		
・		
0	(ブランク行)	
NE, I T, I N, I J, I K, I L, I N N, I J J, I K K, I L L, I M	Format (11I5)	↓ (要素数行だけ必要)
・		
0	(ブランク行)	
N S T P	Format (I5)	
ここで、	N : みかけ節点番号 (注) みかけ節点については図 4-4 を参照	

X, Y : みかけ節点の座標
 $IX1 \sim IX3$: 実質節点1~3 (最大3つ) の x 方向の拘束条件
 (固定 1, 自由 0)
 $IY1 \sim IY3$: 実質節点1~3 (最大3つ) の y 方向の拘束条件
 (固定 1, 自由 0)
 NN : みかけ節点で定義された実質節点定義数 (最大3つ)
 IC : クラックの判定の有無 (有 1, 無 0)
 $N1 \sim N3$: みかけ節点で定義された実質節点の番号 (最大3つ)
 IC : クラックの有無 (初期値 0)
 ICD : クラックの方向 (x 方向 0, y 方向 1)
 ICC : クラックレベル (数の大きいものを優先してクラックを発生させる。)
 NE : 要素番号
 IT : 要素種類
 (コンクリート, 岩盤など 0, 鉄筋 1, ひび割れ結合バネ要素 2)
 IN, IJ, IK, IL : 要素構成節点番号
 (みかけの節点番号, 鉄筋は両端の2節点, バネ要素は1つの節点を定義する)
 INN, IJJ, IKK, ICC : 要素構成節点 (実質節点番号)
 IM : 材料番号
 $NSTP$: 解析ステップ数

なお、二重節点部 (ひび割れ定義部) の構造を図 4-4 に示す。見かけ節点、実質節点、鉄筋要素、バネ要素などの定義法を確認されたい。

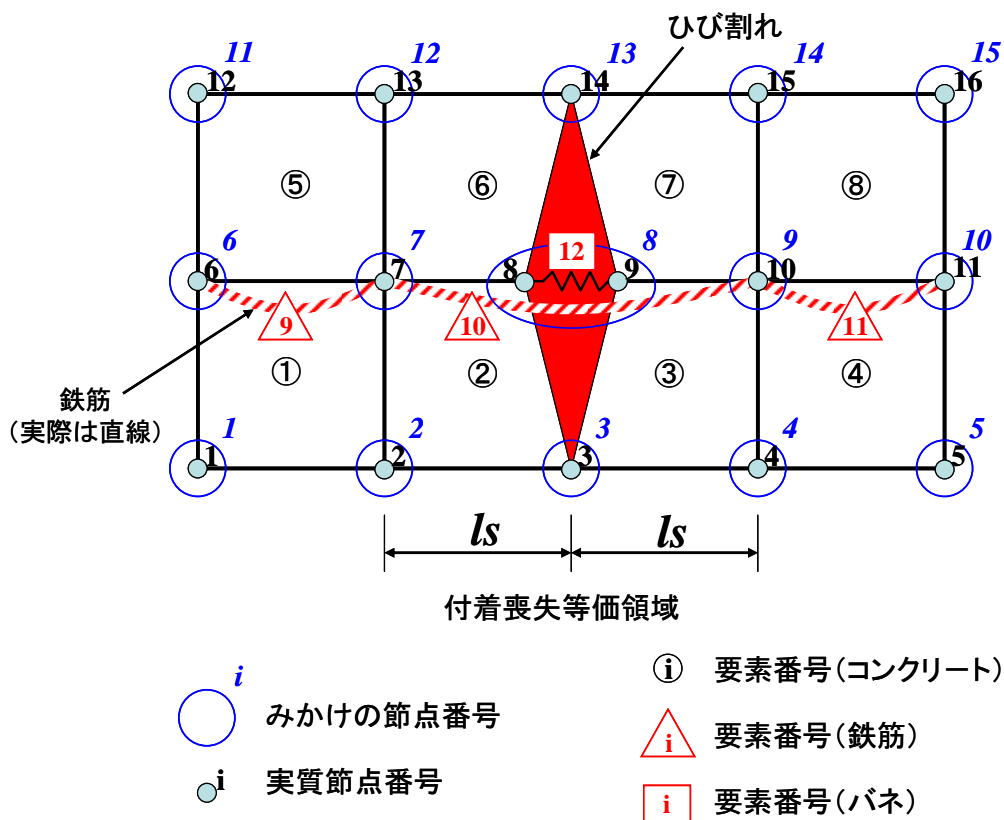


図-4.4 二重節点部分の構造

データファイル名	*.em
N	Format (I5)
E 1 (1)	Format (F10. 1)
・	(ステップ数行だけ必要)
・	
・	
E 2 (1)	Format (F10. 1)
・	(ステップ数行だけ必要)
・	
・	
E 3 (1)	Format (F10. 1)
・	(ステップ数行だけ必要)
・	
・	
ここで、	N : 材料数
	E i (j) : 材料番号 i の j ステップでのヤング係数
注)	バネ要素についてはダミー値 (例えば 0.0) を入力する。

データファイル名	*.ten
T S 1	Format (F6. 2)
T S 2	
・	(ステップ数行だけ必要)
・	
・	
ここで、	T S i : i ステップのひび割れ解析対象部分のコンクリートの引張強度

データファイル名	*.po
N	Format (I5)
P O 1	Format (F6. 3)
P O 2	
・	(材料数行だけ必要)
・	
・	
E P 1	Format (F9. 6)
E P 2	
・	(材料数行だけ必要)
・	
・	
ここで、	N : 材料数
	P O i : 材料番号 i のポアソン比
	E P i : 材料番号 i の熱膨張係数

データファイル名	*.dt
	<pre> t 1 t 1 . . . t 1 Format (11F6.1) 1 2 1 1 t 1 t 1 . . . t 1 (要素数×ステップ数個必要) 1 2 1 3 2 2 </pre>
	<p>ここで、t_{ij} : 要素 i の j ステップでの温度変化</p> <p style="margin-left: 40px;">i</p> <p>(注) パネ要素のデータは不要</p>

データファイル名	*.ti
	<pre> t 1 Format (F6.2) t 2 . . . </pre> <p>(ステップ数行だけ必要)</p>
	<p>ここで、t_i : i ステップの時間 (単位 : 日)</p>

データファイル名	*.-tp
	<p>付属の温度解析プログラムを実行すると、自動的に作成されるファイル、で各ステップ毎の各要素（鉄筋要素は含まれていない）の温度変化が Format (10F7.2) で収納されている。本ひび割れ幅解析プログラムでは、計算に使用する全要素の温度変化データを *.dt ファイルから読み込むが、前述のように本プログラムがもっている「温度変化による荷重データ作成機能」を用いるとこの *. -tp ファイルからひび割れ幅解析用の温度変化データファイル *.dt ファイル（鉄筋要素に対するデータも生成されている）を作成するようになっている。</p> <p>なお、FEMひび割れ幅法では、旧コンクリート（スラブ）は発熱体としては、扱えないので注意すること。</p>

なお、このプログラムでは、データの自動生成機能があり、要素分割に関するデータを一時的にワークファイルに保管している。ワークファイルの仕様を以下に示す。

データ一時保管用ワークファイル名 要素分割（縦方向）	*. f03
L G L C L Format (I5)	
ここで、L G：地盤の高さ方向分割数 L C：旧コンクリートの高さ方向分割数 L：新コンクリートの高さ方向分割数（鉄筋のかぶりを含む）	
岩盤・旧コンクリートの分割高H	Format (F10.3) L G + L C だけ必要
↓	
HH 1 HH 2 Format (F10.3)	
ここで、HH 1：鉄筋のかぶり（m） HH 2：新コンクリートの分割高さ（m）	

データ一時保管用ワークファイル名 要素分割（横方向）	*. f04
W X Format (I5)	
ここで、W X：横方向の分割数（偶数）	
横方向の分割幅W Format (F10.3)	↓ 左右対称なので、半分だけ入力 W X / 2 だけ必要
A N Format (I5)	
ここで、A N：鉄筋配置位置	
鉄筋配置位置A A A（下からの番号）	↓ Format (I5) A N だけ必要

4.5 入力データの作成および出力結果

マスコンクリートのひび割れ幅計算用プログラム (JCMAC2) によるひび割れ解析の例として、図-4.6 に示すようなコンクリート基礎上に打設された壁状構造物を例に、ひび割れ幅を求める。なお、鉄筋は、新コンクリート部分に一段あたり6本の鉄筋 (D13) が入っているものとする。一段あたりの鉄筋の断面積は、 $6 \times 1.267\text{cm}^2 = 7.602\text{cm}^2$ であり、全断面での鉄筋量は、 $7.602\text{cm}^2 \times 5 \text{段} = 38.014\text{cm}^2$ 、鉄筋比 $p=0.32\%$ となる。温度解析は、第2章に示したとおり、既に行われているものとする。なお、FEMひび割れ幅解析では、旧コンクリートを発熱体としては扱えないので、温度解析を行う際に注意すること。

本例では要素セクションを図-4.7のように定義し、これを5つ連結して全体の要素分割図を作成するものとする。FEMひび割れ幅解析では、データの入出力ファイルとして、表-4.1のファイルを使用している。データはこれらのファイルにテキスト形式で保存されているので、既存のプログラム (テキストエディター等) を使い、データの修正や加工を行うことができる。

なお、本システムでは、データファイル名を **ファイル名+内容識別子** の形で付けるようになっている。ファイル名の部分はユーザーが入力した問題名であり、**内容識別子** は、システムが自動的に付けるものである。

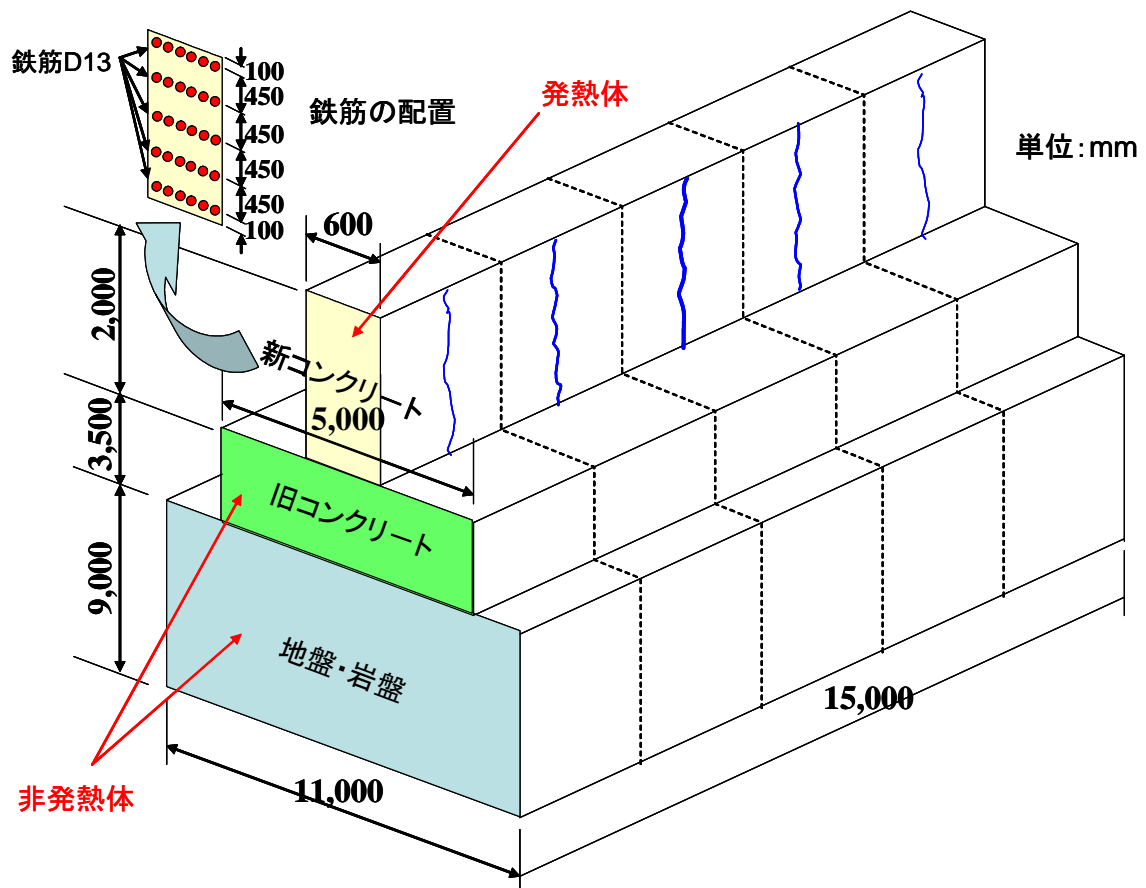


図-4.6 解析対象構造物

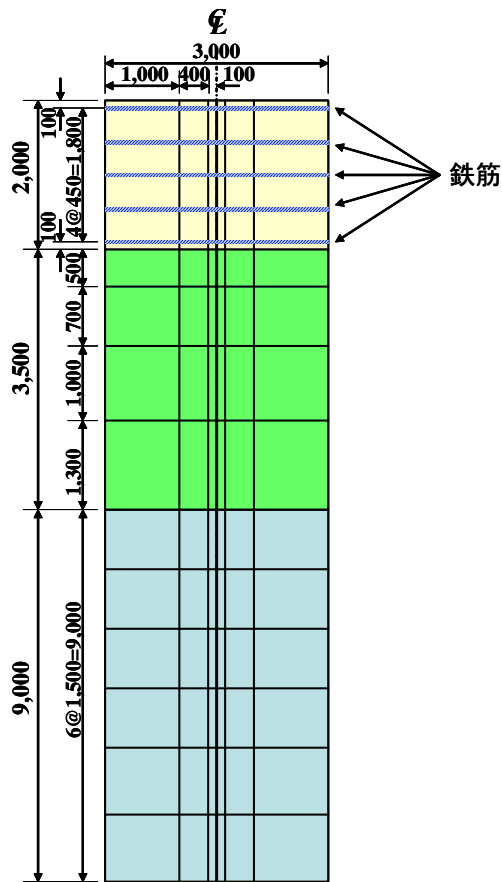
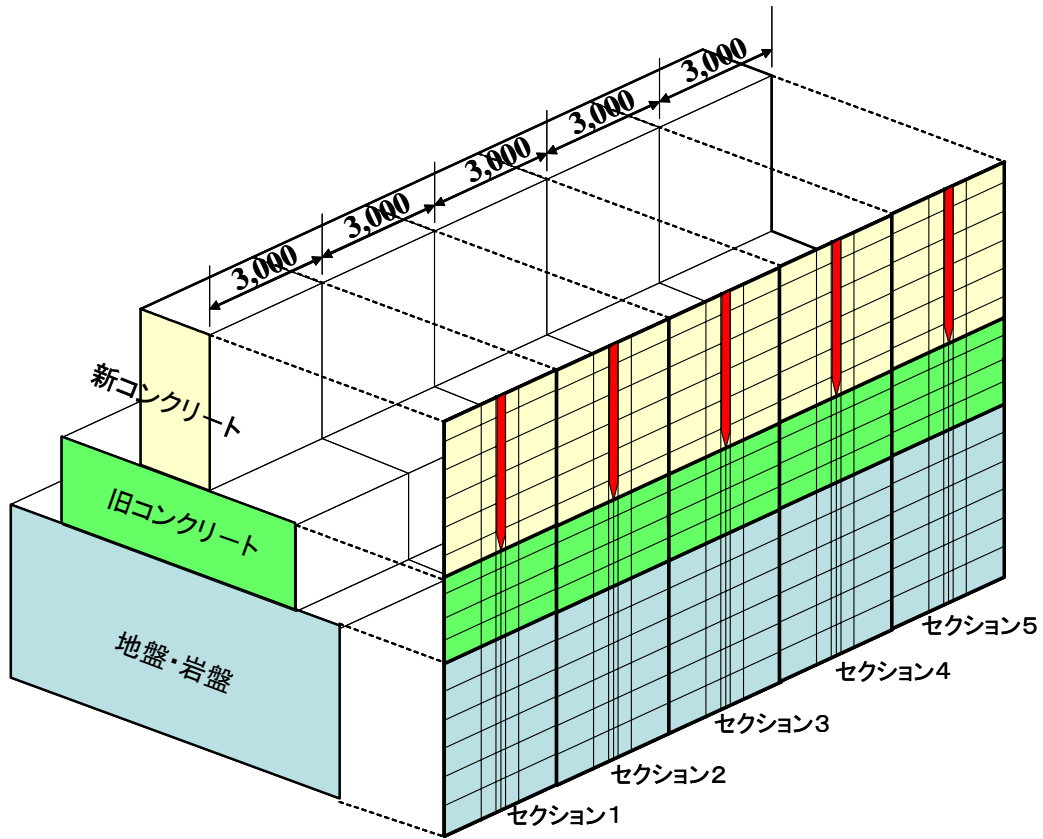


図-4.7 セクションの要素分割

(1) 解析条件設定

まず始めに「解析条件設定」を選ぶ。初めての場合にはファイル名を聞いてくるので、ファイル名を入力する。ファイル名の入力が終わると、平面問題の種類と荷重の種類を入力する。デフォルトの状態、「平面ひずみ」、「温度」が選択されているので、特に変更する必要がなければ、「OK」ボタンを押す。

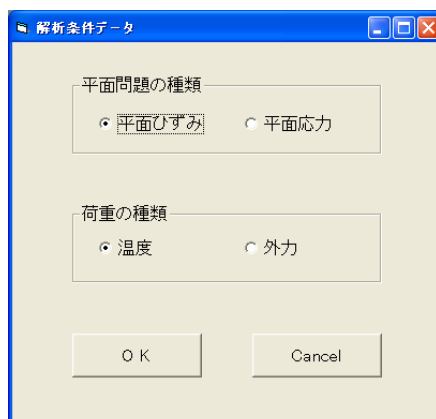
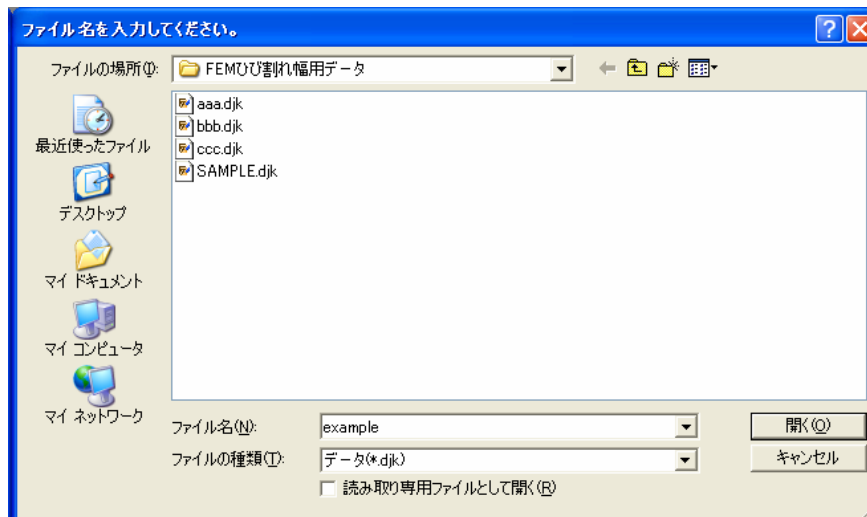
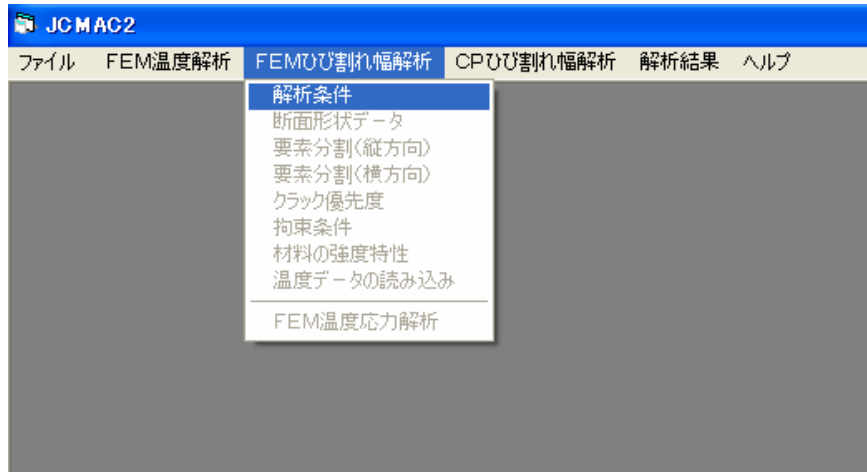


図-4.8 解析条件設定

(2) 断面形状データ

次に「断面形状データ」を選択し、断面の形状データを入力する。

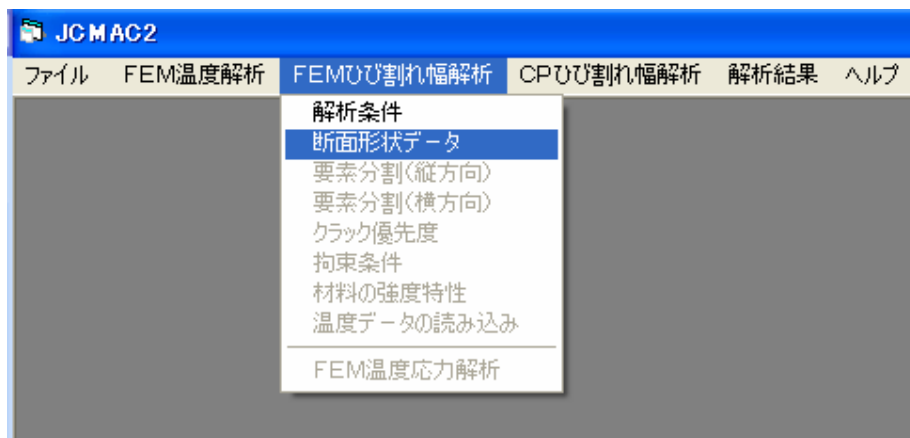


図-4.9 断面形状データ設定のメニュー選択画面

断面形状データは、

- 材料1：岩盤要素の奥行き寸法 (cm)
- 材料2：旧コンクリートの奥行き寸法 (cm)
- 材料3：新コンクリートの奥行き寸法 (cm)
- 材料4：鉄筋要素の断面積 (cm²)

について入力する。入力する単位系は、cmなので注意すること。

なお、奥行き寸法とは、断面の幅のことで、例えば温度解析を次のような断面で行っている場合には、温度解析で考慮している断面の幅が奥行き寸法となる。

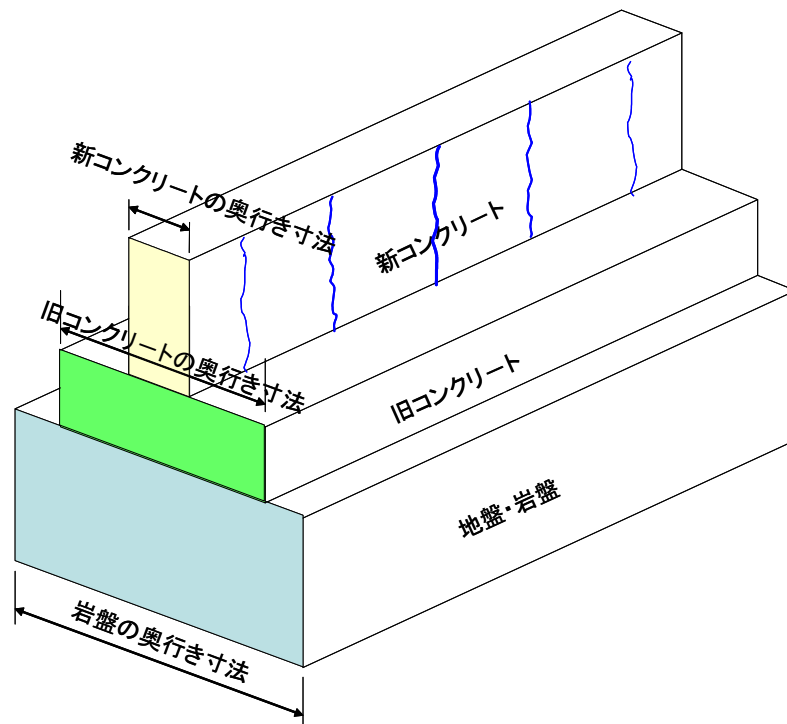


図-4.10 奥行き寸法

また、鉄筋要素の断面積とは、一段あたりの鉄筋の断面積のことで、例えば新コンクリート部分に一段あたり、6本の鉄筋（D13）が入っている場合には、 $6 \times 1.267 \text{cm}^2 = 7.602 \text{cm}^2$ となる。

材料番号	断面形状	値
材料番号1	岩盤要素の奥行き寸法 (cm)	1100
材料番号2	旧コンクリート要素の奥行き寸法 (cm)	500
材料番号3	新コンクリート要素の奥行き寸法 (cm)	60
材料番号4	鉄筋要素の断面積 (cm ²)	7.602

図-4.11 断面形状データの設定

解析によっては、岩盤を含めない場合もある（例えば、スラブと壁のみで温度解析を行った場合など）。このときには、材料番号1の岩盤要素の奥行き寸法に0（ゼロ）を入力する。

(4) 要素分割 (横方向)

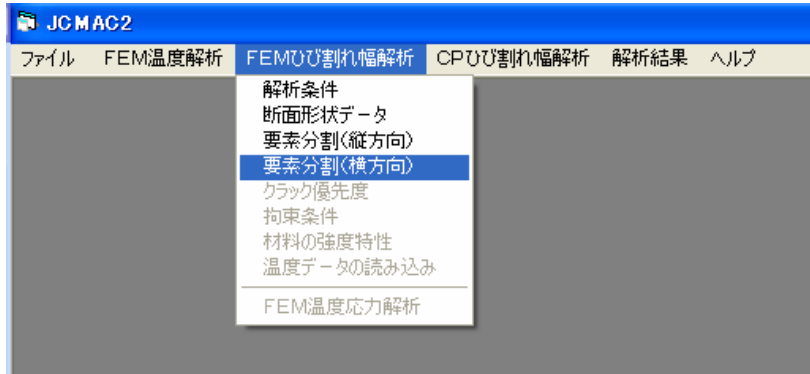


図-4.14 要素分割 (横方向) のメニュー選択画面

まず始めに、横方向の分割数 (偶数) を入力する。次に分割幅を左から入力する。分割は左右対象であるため、半分の領域について行う。また、ひび割れに隣接する要素の幅が付着喪失等価領域 l_s になる。

最後に鉄筋配置位置が何カ所かを入力し、新コンクリート下面からの位置を入力する。

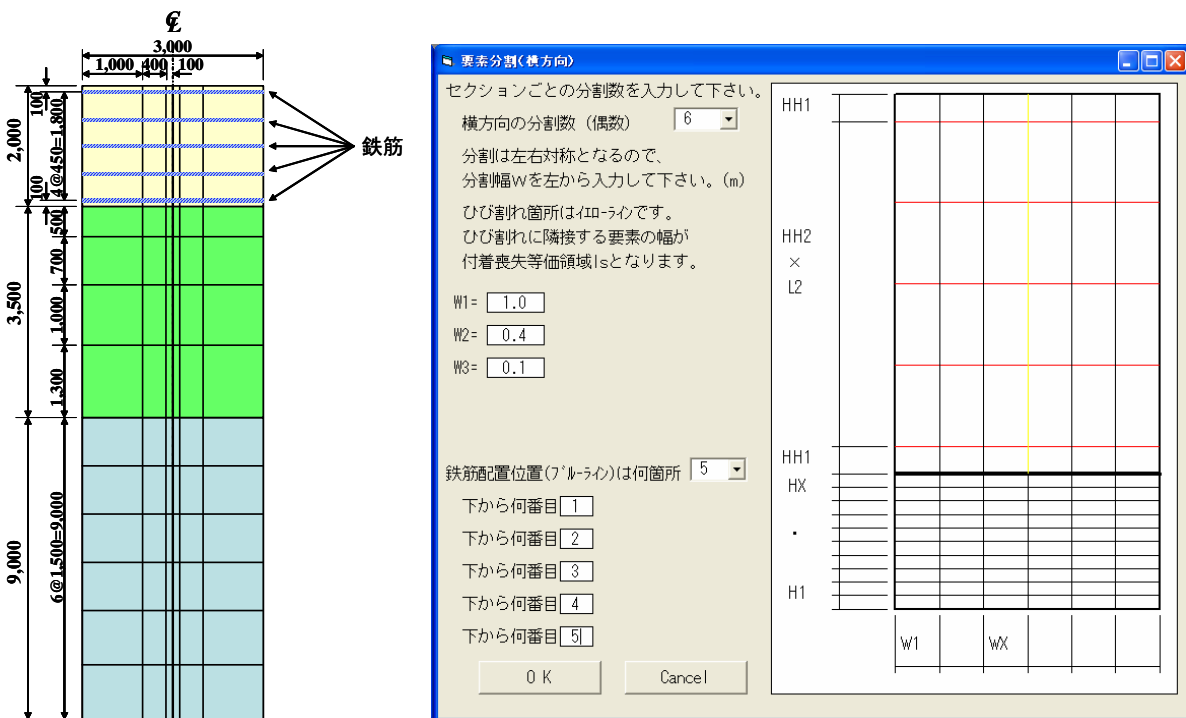


図-4.15 要素分割 (横方向)

(5) クラック優先度

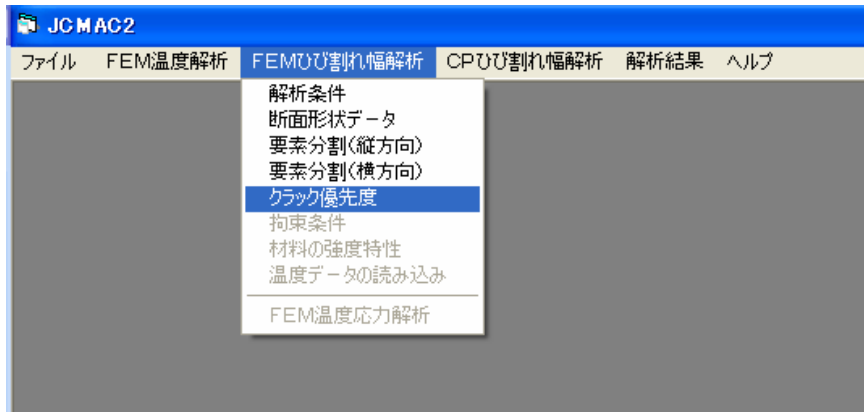


図-4.16 クラック優先度のメニュー選択画面

はじめに、横方向のセクション数を入力する。要素自動分割機能では、1セクションに対する要素分割を行うので、そのセクションがいくつあるかを入力する。

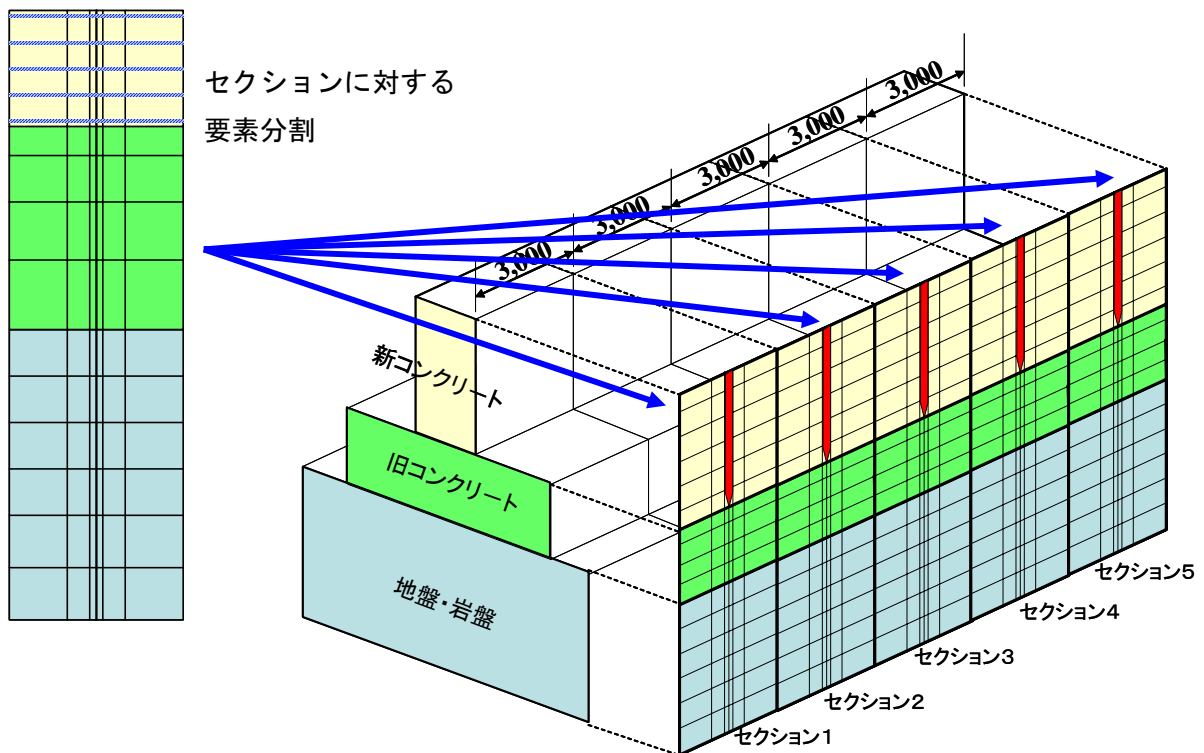


図-4.17 セクション数

図-4.18 ひび割れ発生 の 優先順位入力画面

次に、ひび割れの本数を入力する。ひび割れは、セクションの中央に入ることから、ひび割れの本数は、最大でセクション数までとなる。

さらに、ひび割れ発生 の 優先順位を入力する。ひび割れ発生 の 優先順位は、現実的に考えてひび割れが入りやすいところから、優先順位をつける。したがって、ひび割れが一番発生しやすいのは中央部分なので、一般には、中央部分から外に向かって優先順位を付けます。

このとき、優先順位に0(ゼロ)を付けると、そのセクションではひび割れは発生しません。

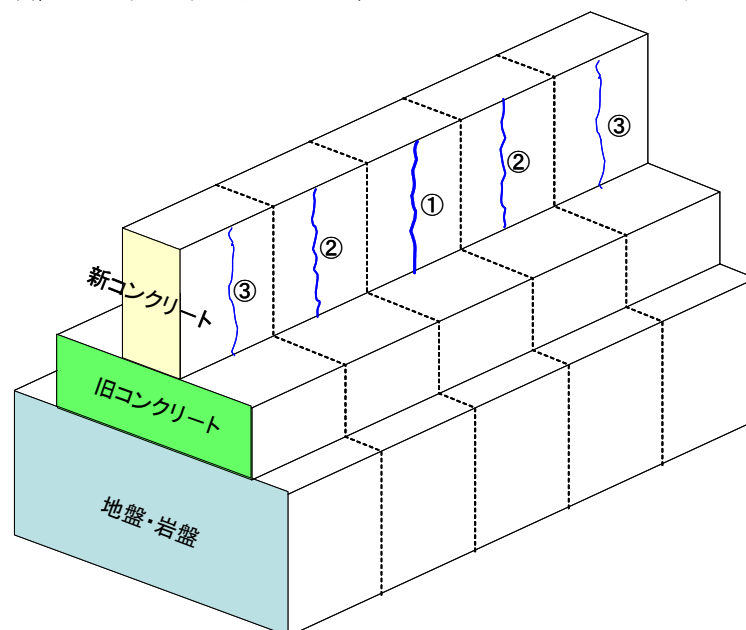


図-4.19 ひび割れ発生 の 優先順位

(5) 拘束条件

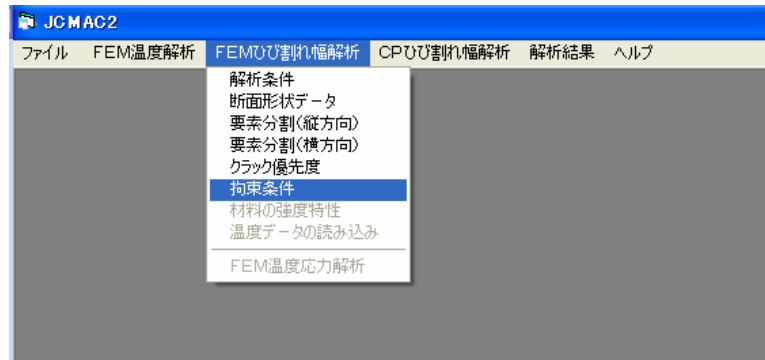


図-4.20 拘束条件のメニュー選択画面

「拘束条件」をクリックすると、図-4.21 に示すような要素分割図が現れるので、拘束したい節点をマウスをドラッグする。

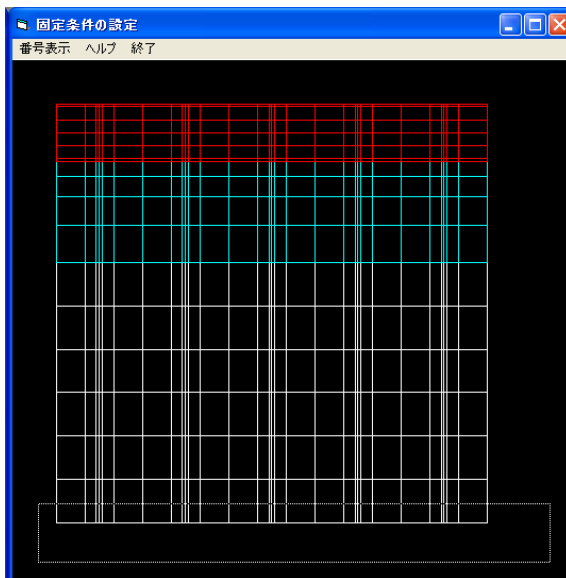


図-4.21 節点の選択

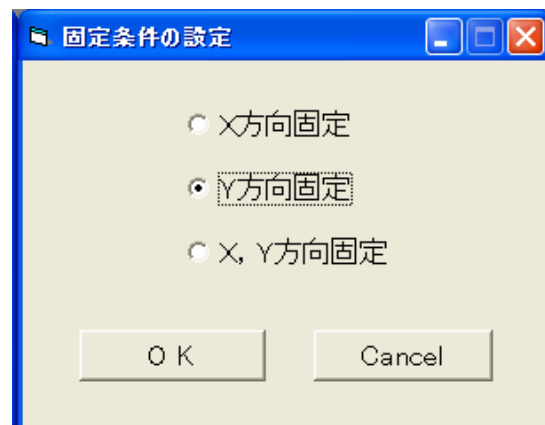


図-4.22 固定条件の選択

マウスでドラッグすると節点に黄色い印がつくので、マウスの右ボタンを押して「固定条件の設定」を選択する。そうすると図-4.22 の画面が現れるので、拘束条件を選択する。選択は、図-4.21 の上にあるメニューの「終了」を選択するまで何度でも行える。

図-4.23 に設定した拘束条件を示す。

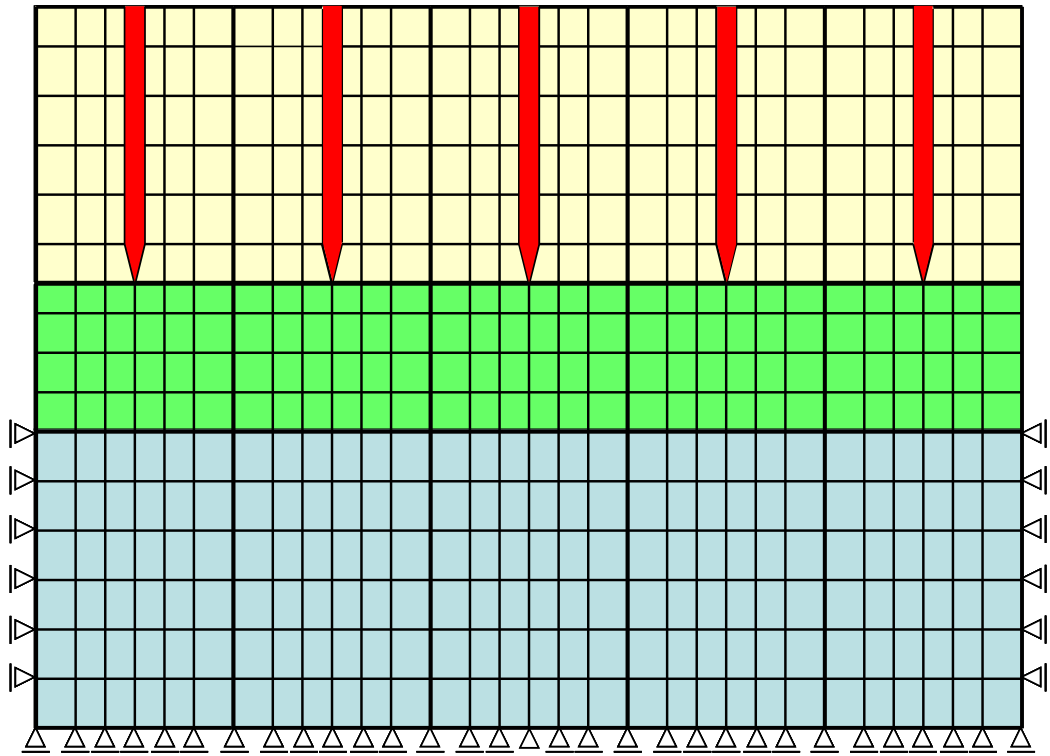


図-4.23 拘束条件

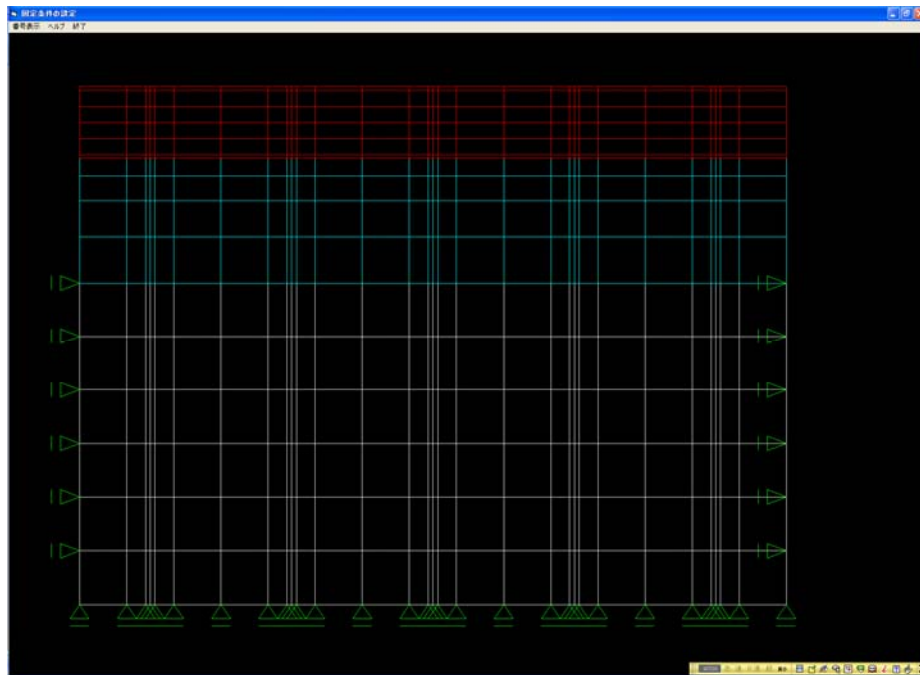


図-4.24 拘束条件の設定

(6) 材料の強度特性

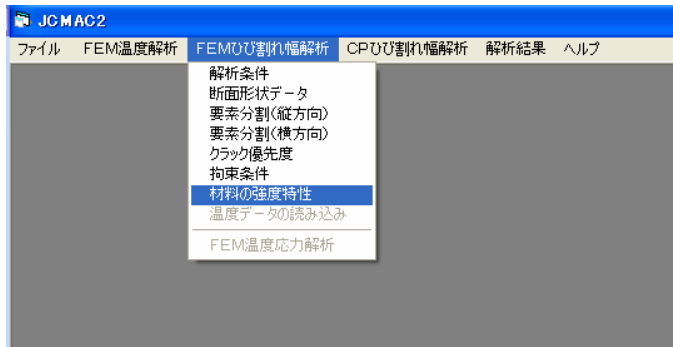


図-4.25 材料の強度特性のメニュー選択画面

材料の強度特性を設定する。メニュー画面より「材料の強度特性」をクリックすると、図-4.26 に示す画面になる。ここで、各材料の強度特性値を設定する。材料番号1（地盤・岩盤要素）、材料番号2（旧コンクリート要素）では、図-4.27 に示すように、ヤング係数、ポアソン比、線膨張係数を設定する。ヤング係数以外は、デフォルトで値が設定してあるので、必要であれば変更する。新コンクリートの場合は、セメントの種類と圧縮強度を入力するとコンクリート標準示方書に準じて自動的に計算される。

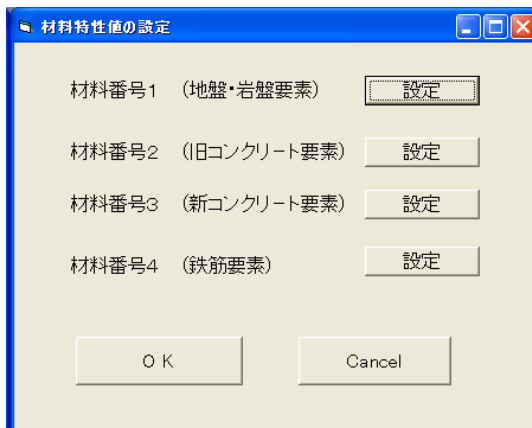


図-4.26 材料選択メニュー

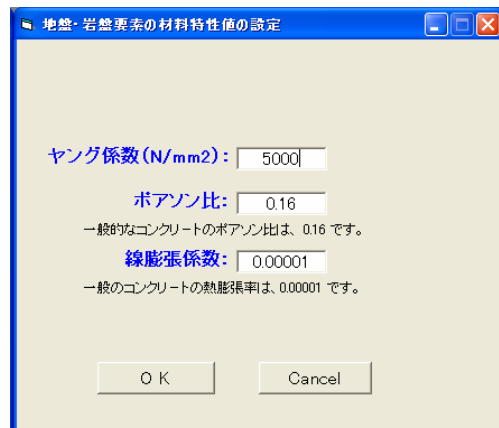


図-4.27 材料特性値設定画面

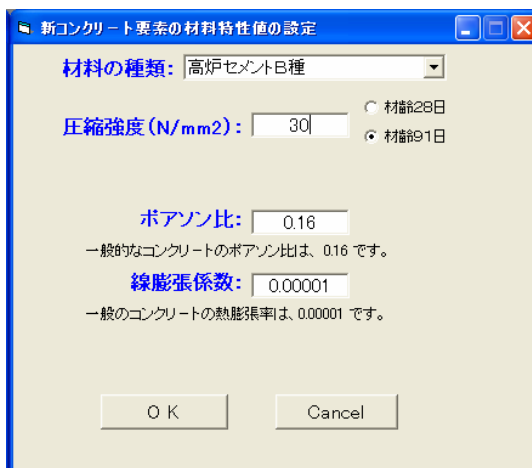


図-4.28 材料特性値設定（新コンクリート）



図-4.29 材料特性値設定（鉄筋）

(7) 温度データの読み込み

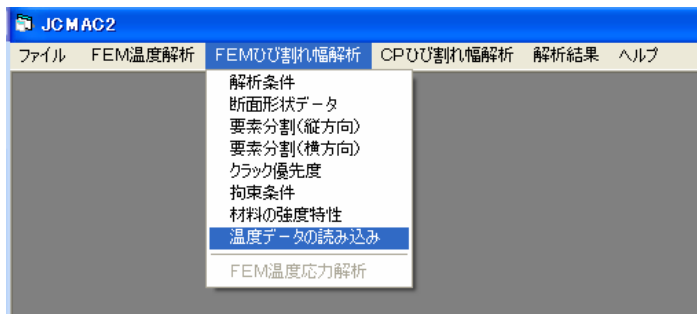


図-4.30 温度データの読み込み

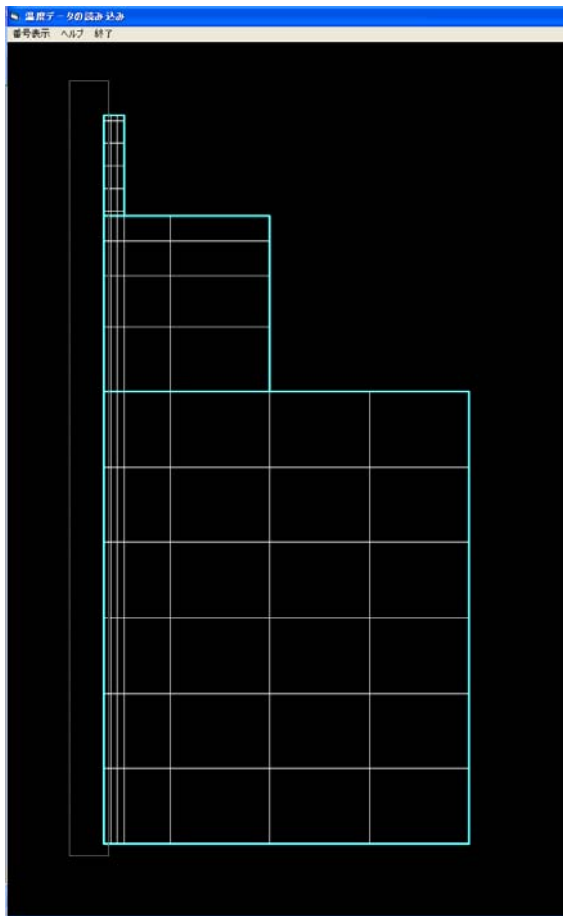


図-4.31 層の中心温度を使う場合

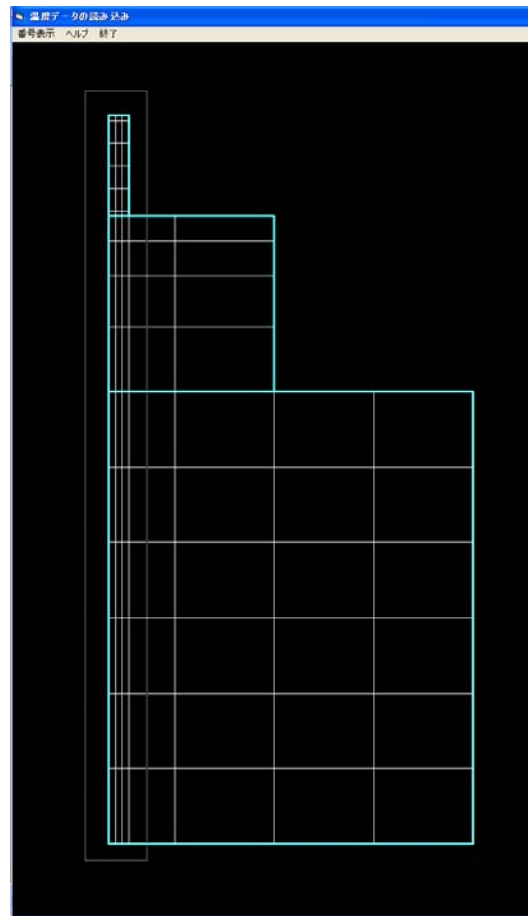


図-4.32 層の平均温度を使う場合

温度変化データの作成を行う。スラブ状構造物の解析では、温度解析断面とひび割れ解析断面が同一であるのでデータの変換は行わず、温度解析結果をそのままコピーする。壁状構造物の解析では、温度解析断面とひび割れ解析断面が異なっているので、温度解析断面からデータを抽出し、温度変化データを作成する。

温度変化データとして、層の中心温度を使う場合は、図-4.31のように節点を選択し、層の平均温度を使う場合には、図-4.32のように節点を選択する。選択が終わったら、マウスの右ボタンをクリックする。

(8) FEM温度応力解析

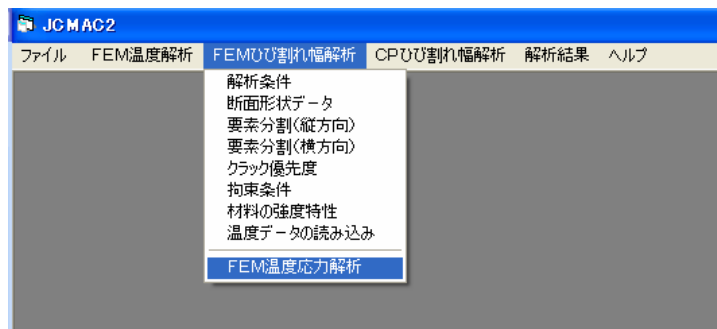


図-4.33 FEM温度応力解析の開始

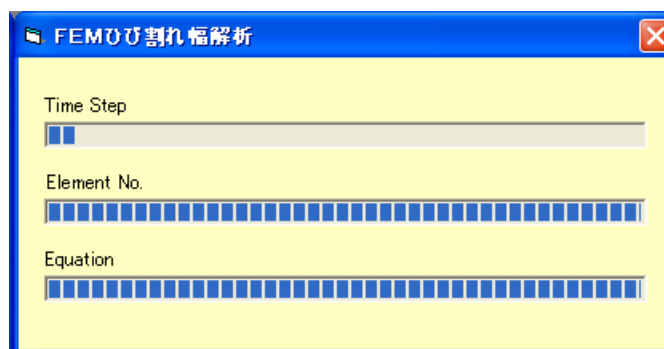


図-4.34 計算経過の表示

「FEM温度応力解析」をクリックし、計算を始める。計算中は、図-4.34のような画面が現れ、計算経過が表示される。

(9) 計算結果

計算結果は、時系列のグラフとして

- ① 材齢と応力の関係
- ② 材齢とひび割れ指数の関係
- ③ 材齢とひび割れ幅の関係

が出力される。応力とひび割れ指数は、求めたい要素を選択し、ひび割れ幅は、求めたい節点を選択する。

また、④変形図や⑤要素分割図も出力可能である。

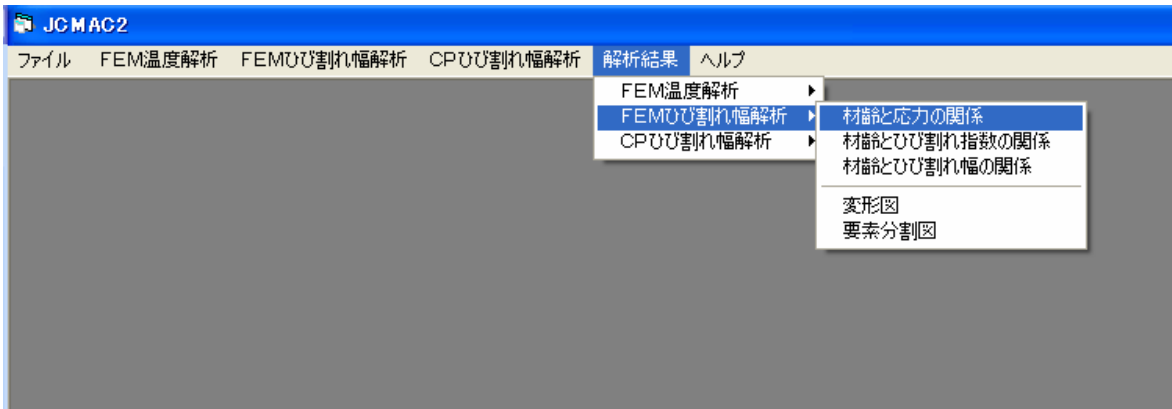


図-4.35 計算結果の出力メニュー画面

- ①材齢と応力の関係
- ②材齢とひび割れ指数の関係

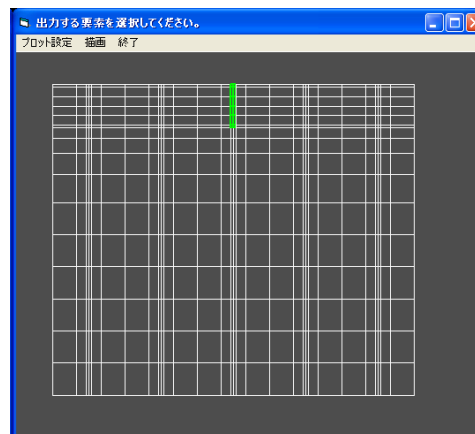


図-4.36 要素選択画面

図-4.36 に示す要素選択画面で、表示したい要素をマウスでドラッグし、マウスに右ボタンをクリックし、グラフを表示する。

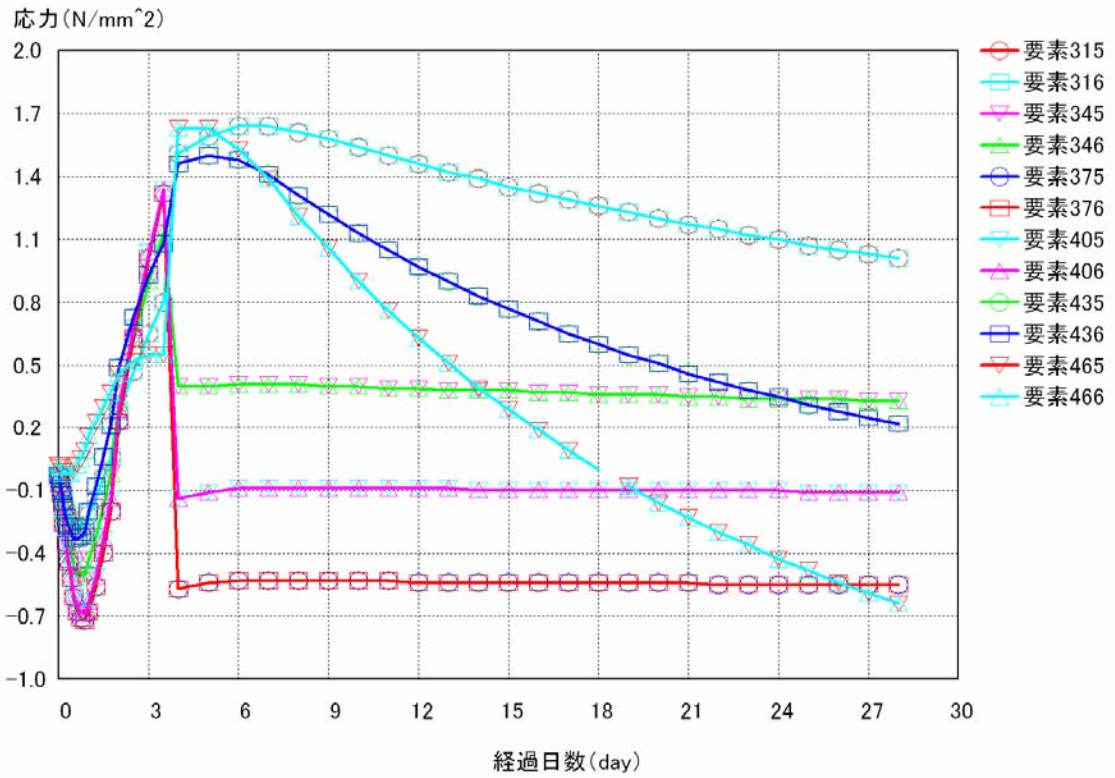


図-4.37 応力の時刻歴

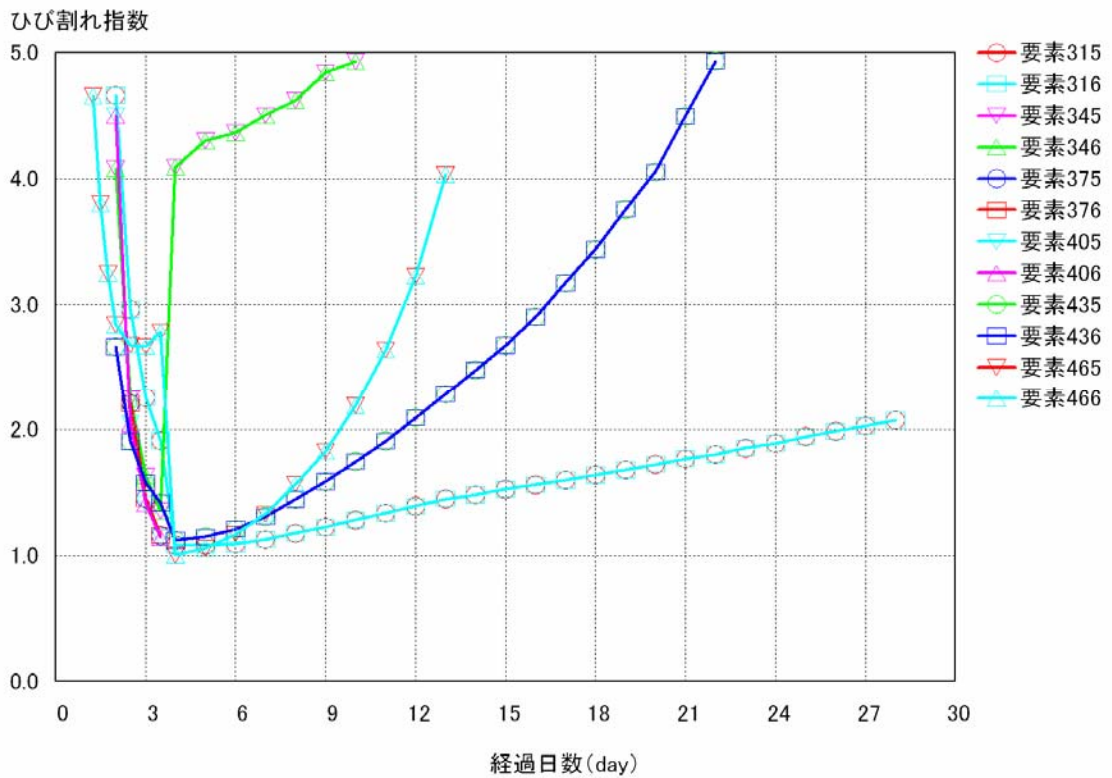


図-4.38 ひび割れ指数の時刻歴

③材齢とひび割れ幅の関係

図-4.39 に示す要素選択画面で、表示したい要素をマウスでドラッグし、マウスに右ボタンをクリックし、グラフを表示する。

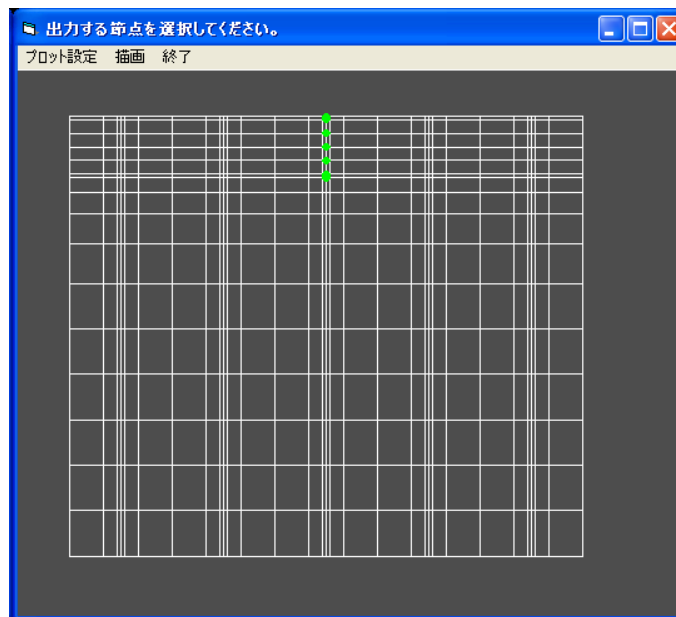


図-4.39 節点選択画面

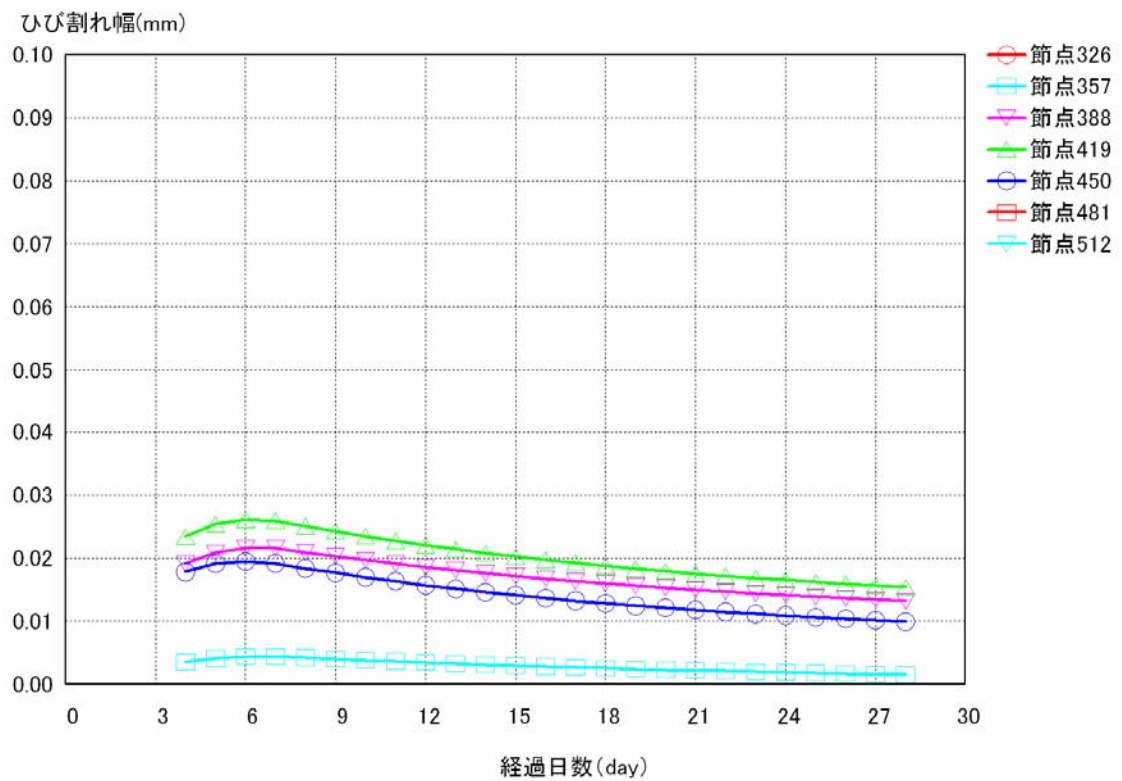


図-4.40 ひび割れ幅の時刻歴

④変形図

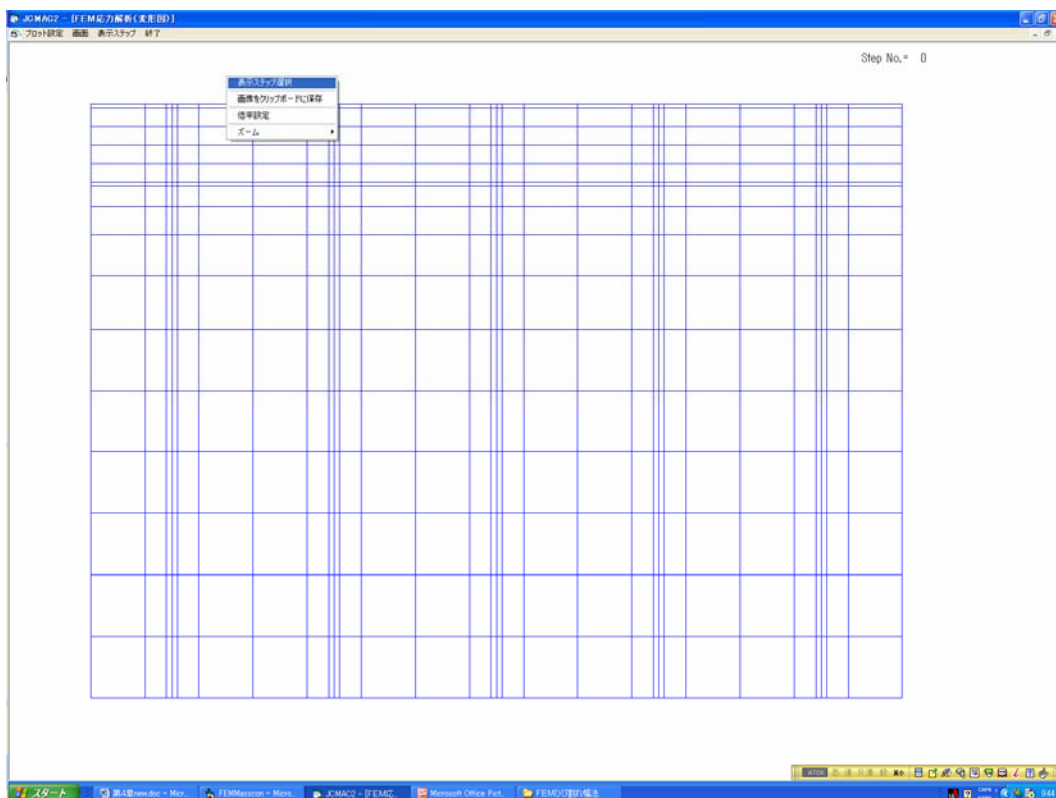


図-4.41 変形図（表示ステップ選択）

メニュー画面から「変形図」を選択すると図-4.41になる。ここで、マウスの右ボタンをクリックすると、ポップアップメニューが現れるので、「表示ステップ選択」をクリックする。

図-4.42 に示す解析ステップを表示する画面が現れるので、変形図を表示したいタイムステップを選択する。「全ステップ表示」をクリックすると変形図がアニメーションで表示される。



図-4.42 表示ステップ選択

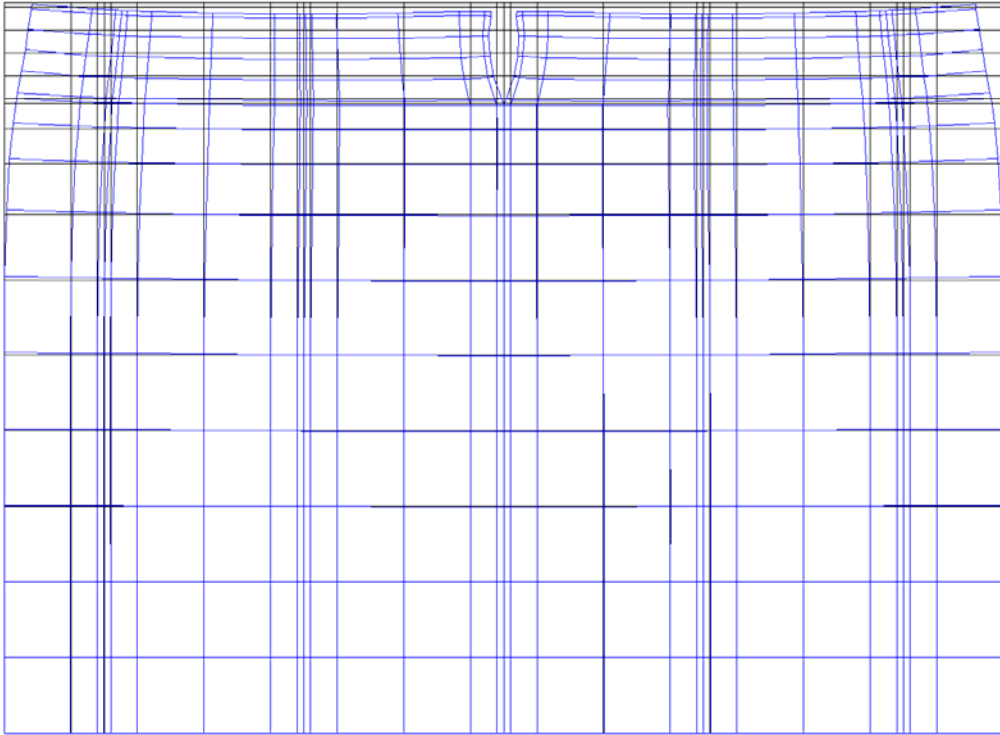


图-4.43 变形图

⑤要素分割図

メニュー画面から要素分割図を選択すると、図-4.44 に示す要素分割図が出力される。「プロット設定」の中にある「要素番号表示」、「節点番号表示」をクリックすると、要素番号と節点番号が表示される。「ズーム」を選択すると画像が拡大される。

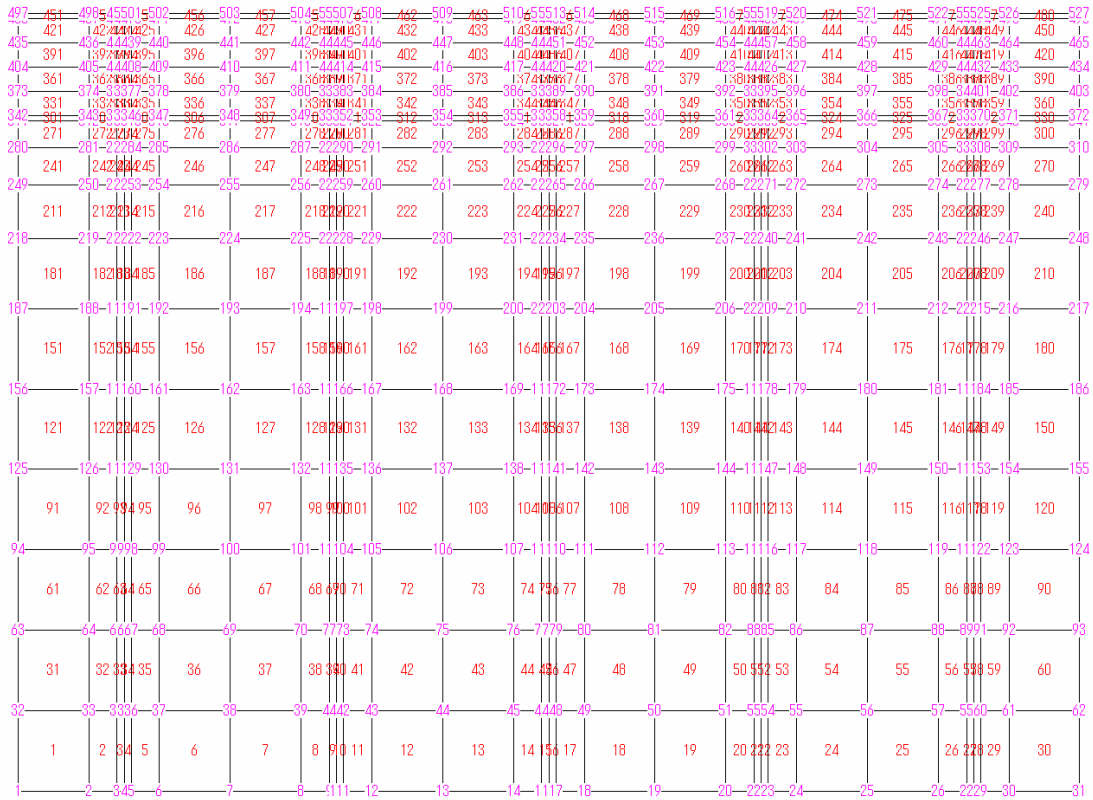


図-4.44 要素分割図

⑥出力結果ファイル (*.out)

出力結果ファイル (*.out) には、ひび割れ発生までは各材齢 (日) ごとに、要素の応力 (kg/cm^2 or N/mm^2), 圧縮-, 引張+) が出力される。

ひび割れ解析での出力では、まずひび割れが生じた節点の番号が表示され、次に要素の応力、ひび割れ幅 ((CRACK WIDTH (mm)) が出力される。

なお、出力結果はファイル (ファイル名.out) に自動的に保存されるので、既存のプログラムを用いて加工することができる。

21 STEP

** CRACKING NODE **
388 419
** CRACKING NODE **
450
** CRACKING NODE **
357

ELEMENT STRESS				
ELEM	TYPE	SIG-X	SIG-Y	TAU-XY
1	0	0.00	0.01	0.00
2	0	0.00	0.01	0.00
3	0	0.00	0.01	0.00
4	0	0.00	0.01	0.00
5	0	0.00	0.01	0.00
6	0	0.00	0.00	0.00
7	0	0.00	0.00	0.00
8	0	0.00	0.00	0.00
9	0	0.00	0.00	0.00
10	0	0.00	0.00	0.00
		.		
		:		
		.		
600	1	3.61	0.00	0.00
601	1	1.43	0.00	0.00
602	1	-0.65	0.00	0.00
603	1	-1.56	0.00	0.00
604	1	-1.65	0.00	0.00
605	1	0.41	0.00	0.00
606	2	-6136.36	-3916.85	0.00
607	2	-8582.89	-1204.49	0.00
608	2	-9025.09	0.21	0.00
609	2	-8583.45	1205.35	0.00
610	2	-6137.54	3916.39	0.00
611	2	-10886.15	-5532.05	0.00
612	2	-15949.56	-1799.43	0.00
613	2	-4463.10	0.88	0.00
614	2	-15950.30	1800.02	0.00
615	2	-10893.75	5532.30	0.00
616	2	-10033.97	-3740.93	0.00
617	2	-16707.54	-1417.55	0.00
618	2	-4836.67	1.63	0.00
619	2	-16706.84	1413.93	0.00
620	2	-10028.20	3739.77	0.00
621	2	-5003.71	-1789.19	0.00
622	2	-13060.49	-859.26	0.00
623	2	-10697.33	0.56	0.00
624	2	-13060.41	856.11	0.00
625	2	-5007.77	1778.81	0.00

626	2	603.25	-450.68	0.00
627	2	-4966.20	-254.45	0.00
628	2	-12263.09	-8.17	0.00
629	2	-4966.84	266.64	0.00
630	2	592.54	448.57	0.00
631	2	1022.35	-17.12	0.00
632	2	-110.38	-14.88	0.00
633	2	-579.12	-0.12	0.00
634	2	-111.25	7.69	0.00
635	2	1020.28	13.33	0.00

***** CRACK DATA *****

CRACKING NODE	NODE1	NODE2	NODE3	CRACK WIDTH
357	359	360	0	3.5161E-03
388	395	396	0	1.9156E-02
419	431	432	0	2.3395E-02
450	467	468	0	1.7825E-02