

## 第6章 ハイブリッド CP/FEM 法

### 6.1 ハイブリッド CP/FEM 法の特質

ハイブリッド CP/FEM には、以下のような CP ひび割れ幅法が有していない特質がある。

- ・ ひび割れの 3 次元的な進展の様相を捉えることが可能
- ・ ひび割れ幅のひび割れ面内での分布の計算が可能
- ・ 積み上げ構造における任意位置からのひび割れ発生の予測が可能
- ・ 鉄筋の 2 次元あるいは 3 次元的なひび割れ制御の効果の考慮が可能

ハイブリッド CP/FEM 法を Fig. 6.1 に示す。CP ひび割れ幅法や表面ひび割れ幅法では、検討対象は、ひび割れ面を含めた断面であるが、ハイブリッド CP/FEM 法では、検討対象は、ひび割れ断面を含めて取り出した体積領域である。そして、この体積領域に対して、境界面が平面を保つような制約条件を与えることにより、体積領域に対する剛性方程式を構築している。剛性方程式自体は、基本的には従来の 3 次元 FEM と同様であるが、自由度が全体系に対する剛性方程式に比べ極めて小さいので、鉄筋の効果や付着の厳密な考慮を可能としている。

なお、ハイブリッド CP/FEM 法の理論の詳細は、「**コンクリートの初期ひび割れおよびひび割れ幅進展の解析方法、マスコンクリートソフト作成委員会報告書(日本コンクリート工学協会 2003 年 11 月)**」を参照されたい。

ハイブリッド CP/FEM 法における解析領域と解析断面の選択の一例を Fig. 6.2 に示す。まず、ひび割れ面を包括するように解析断面を選択する。そして、解析断面に対し垂直方向に適切な長さを与えることで解析領域が決定される。

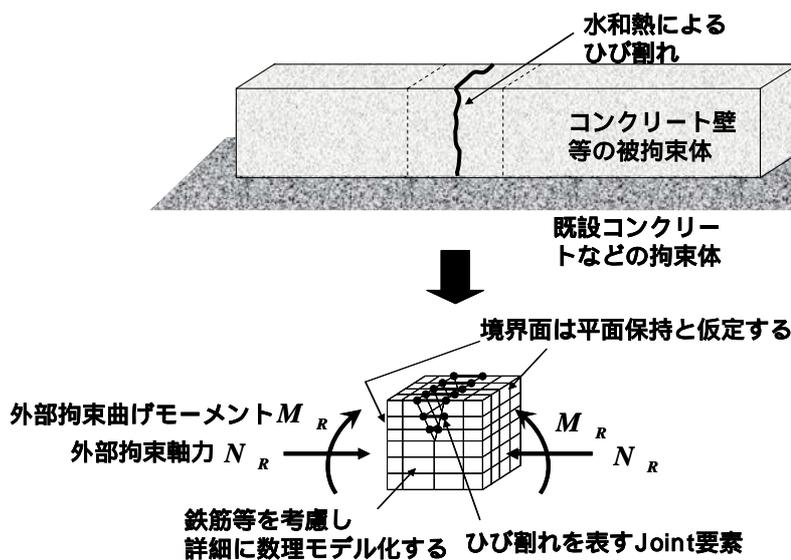


図-6.1 ハイブリッド CP/FEM 法 の 概 念

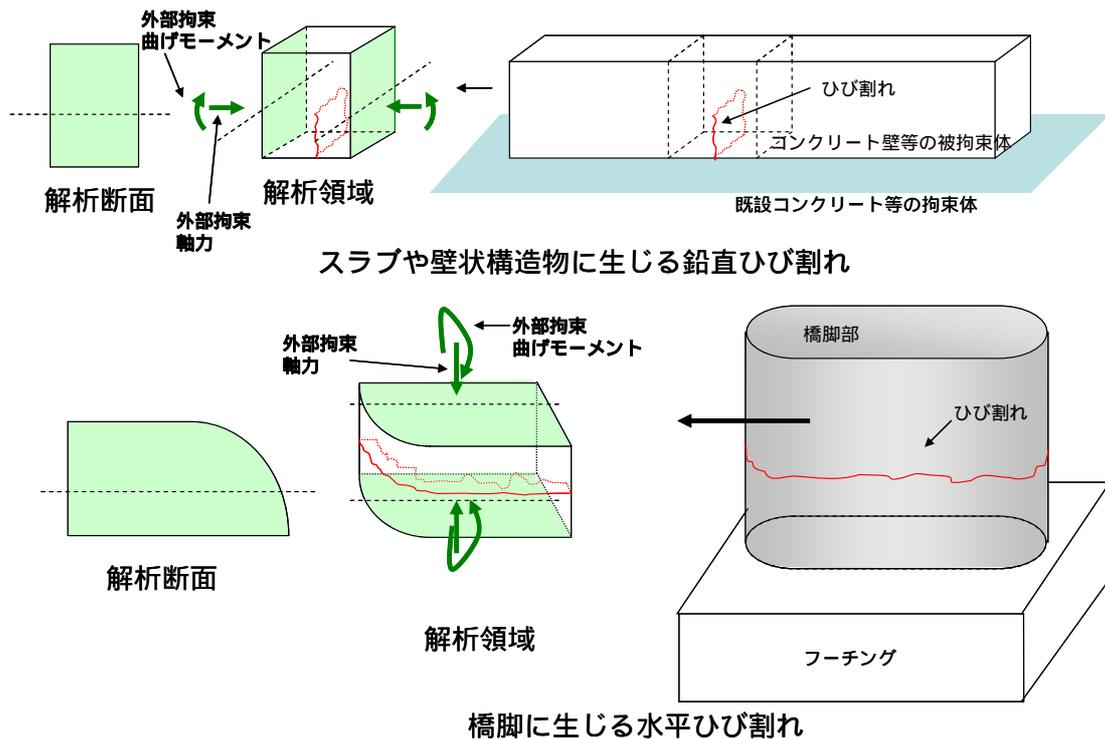


図-6.2 ハイブリッド CP/FEM 法における解析領域と解析断面

## 6 2 Hybrid CP/FEM 法によるひび割れ解析

### 6 2 1 Hybrid CP/FEM 法によるひび割れ解析手順の概要

まず、解析断面を明確にさせた後、解析領域に対して、2次元 FEM による温度解析を実施する。温度解析の流れは CP ひび割れ幅法と同様である。この温度解析ソフトは既に組み込まれているものを使用する。次に、解析領域を決定する。その際、まず解析断面に対し垂直に配筋されている鉄筋の座標および断面積等を与え、さらに、長手方向長さおよびその分割数を与える。これらの与え方の詳細については後述する。最後に、ハイブリッド CP/FEM 法によりひび割れ進展解析を実施する。その際、解析領域の温度履歴は長手方向に一様に与えられる。以上の一連の流れの概略を図-6.3 に示す。

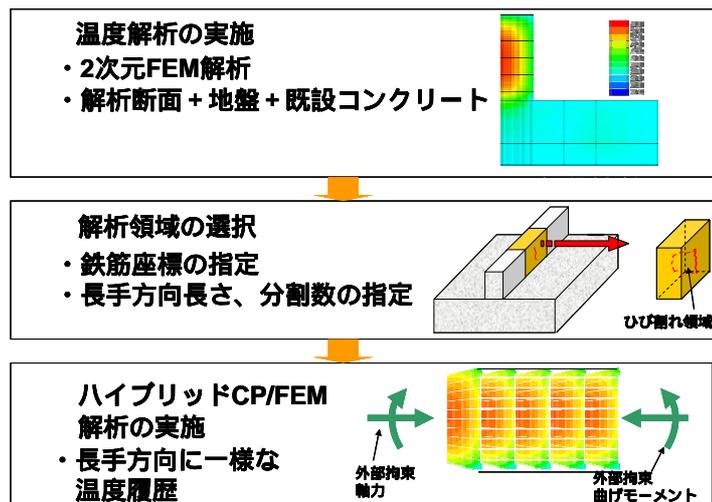


図-6.3 ハイブリッド CP/FEM 法による解析手順概要

## 6 2 2 解析対象構造物および解析条件

解析例は、図-6.4、図-6.5 に示すような、既設コンクリート上に打設された壁状構造物において鉛直方向に生じるひび割れを対象とする。

解析対象の構造物は、名古屋において平成 17 年 10 月 1 日に打設されるものとする。解析は同年 11 月 30 日まで行う。使用されたコンクリートは、普通ポルトランドセメントで、単位セメント量は  $300\text{kg}/\text{m}^3$ 、打設時の練り上がり温度は、 $20$  である。温度解析に用いた熱特性値を表-6.1 に示す。熱伝達境界は解析期間を通してコンクリート露出面とした。

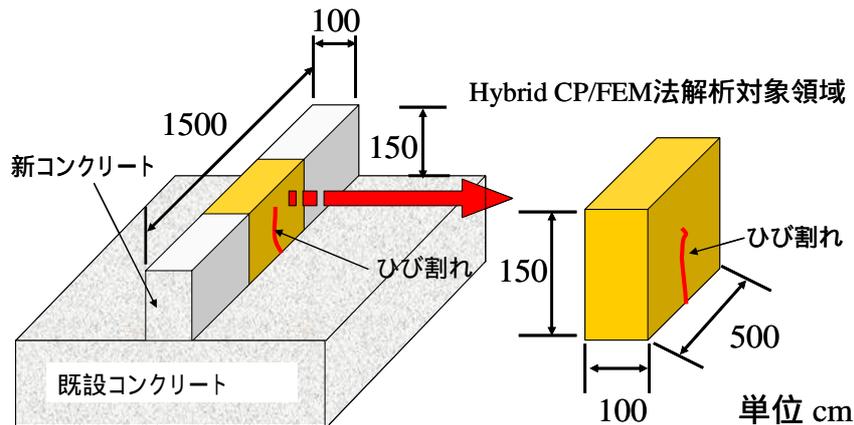


図-6.4 解析対象壁状構造物とハイブリッド CP/FEM 法解析対象領域

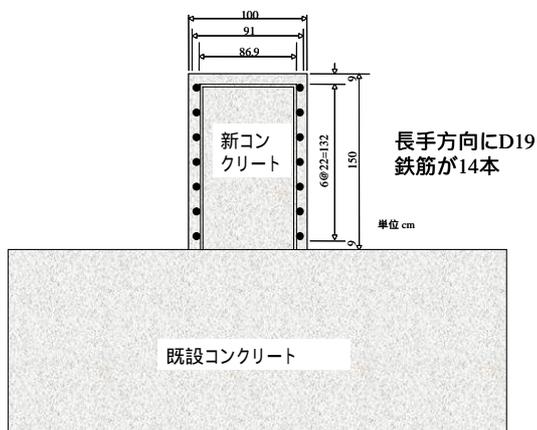


図-6.5 解析対象壁状構造物断面図

表-6.1 温度解析の熱特性値

熱特性値	コンクリート
初期温度( )	20
比熱(kJ/kg )	1.1
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2400
熱伝導率(W/m )	2.7

### 6 2 3 温度解析

ハイブリッド CP/FEM 法では、解析領域における長手方向の温度分布は一様であると仮定している。そのため、温度解析は、断面に対して行われる。すなわち、温度解析方法は CP ひび割れ幅法における方法と全く同一である。温度解析におけるメッシュ図を図-6.6 に示す。

この例では、温度解析の際、ツールバー中の「解析ステップ」において、普通を選択しているが、ひび割れの進展をより詳細に表現するには、超詳細を選択することが望ましい。

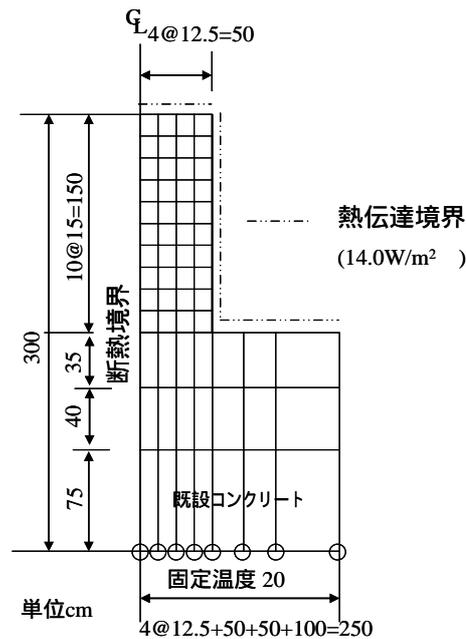


図-6.6 温度解析におけるメッシュ図

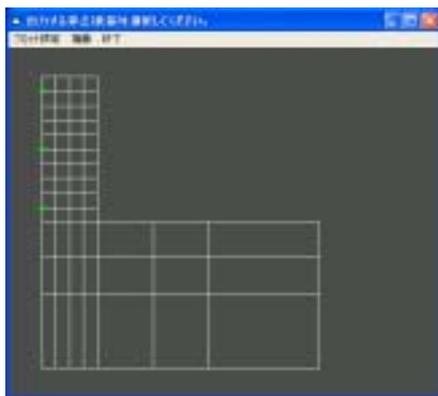


図-6.7 温度経時変化の出力節点を設定する画面

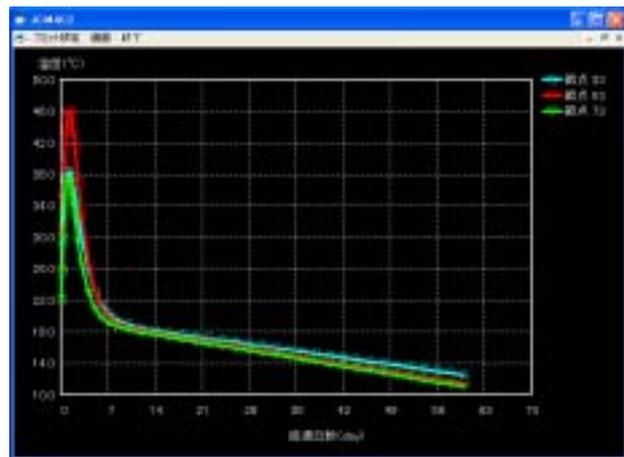


図-6.8 温度解析結果

### 6 2 4 ハイブリッド CP/FEM 法による温度ひび割れ解析

図-6.6 に示したメッシュの FEM 温度解析結果(図-6.7,図-6.8)は自動的に、ハイブリッド CP/FEM 法の解析に受け渡される。温度解析が終了した後、タイトルメニューから「ハイブリッド CP/FEM 法」の「基本条件設定」を選択する(図-6.9 上)。「基本条件設定」を選択すると、図-6.9 下に示す画面が表示される。

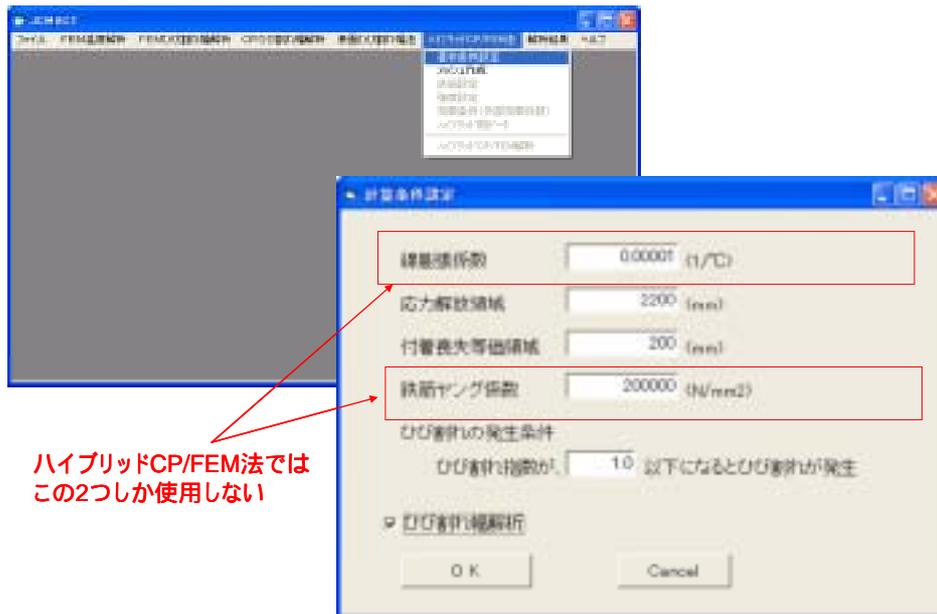


図-6.9 ハイブリッド CP/FEM 法の「基本条件設定」画面

図-6.9 下の画面は，表面ひび割れ幅法と共通であるが，ハイブリッド CP/FEM 法では，応力解放領域，付着喪失等価領域，ひび割れの発生条件およびひび割れ幅解析の項目は使用しない。ハイブリッド CP/FEM 法では，線膨張係数，鉄筋ヤング係数のみを使用される。この例では，線膨張係数は  $1.0 \times 10^{-5}/$  ，鉄筋のヤング率は  $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$  と与えられている。

次に，「メッシュ作成」を選択する(図-6.10 上)と，図-6.10 下左の画面が現われる。この画面は，CP ひび割れ幅法，表面ひび割れ幅法と共通である。次に，マウスで解析領域をドラッグすると，図-6.10 下右となる。そして，マウス右ボタンを押すと「CP 法解析領域選択」と表示されるので，それをクリックする。

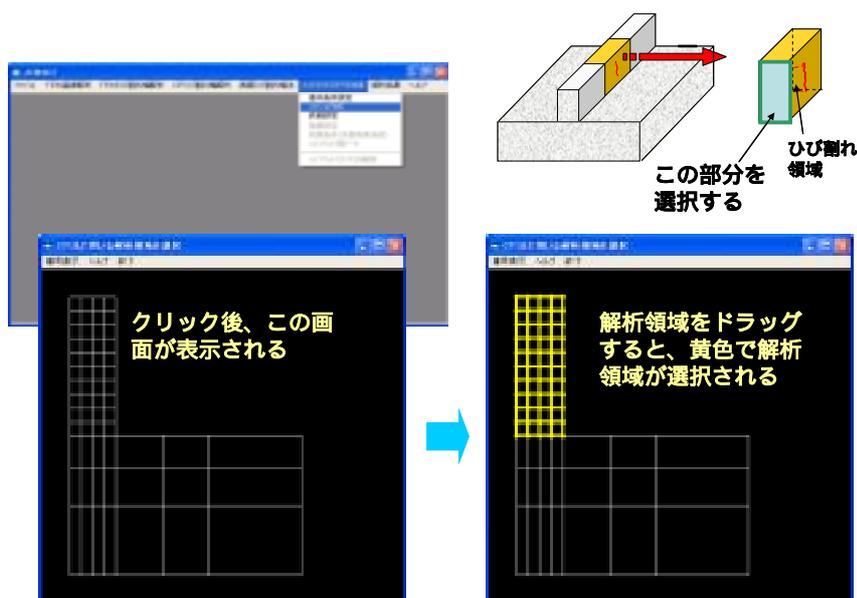


図-6.10 メッシュ作成の選択画面

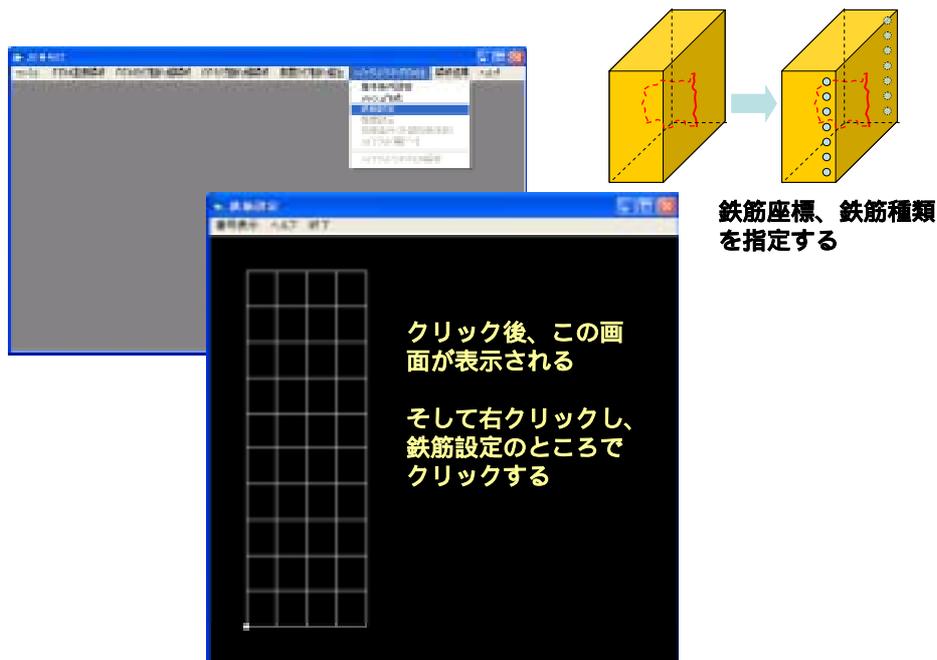
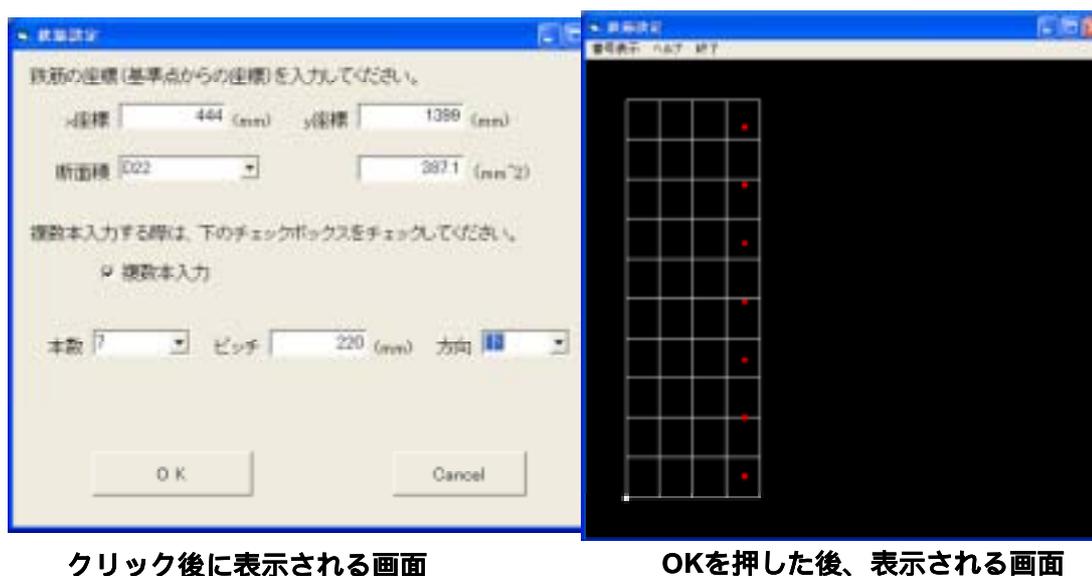


図-6.11 「鉄筋設定」入力画面

続いて、「鉄筋設定」を選択すると、図-6.11 の画面が現われる。

そして、ウィンドウ上で右クリックすると、図-6.12 左のウィンドウが表示される。そして、鉄筋の xy 座標、断面積などを入力する。入力の詳細は、第 3 章 CP ひび割れ幅法の(4)鉄筋設定(pp.29-30)と全く同様であるので、そちらを参照されたい。

鉄筋番号は、鉄筋設定で入力した順に与えられるが、「鉄筋設定」の入力において留意しておくべきことは、層打ち構造の場合は、鉄筋の入力順番に制約があることである。具体的には、図-6.13 に示すように、リフト数が 3 つである場合には、面倒であっても、鉄筋設定は、まず



クリック後に表示される画面

OKを押した後、表示される画面

図-6.12 「鉄筋設定」入力後の画面

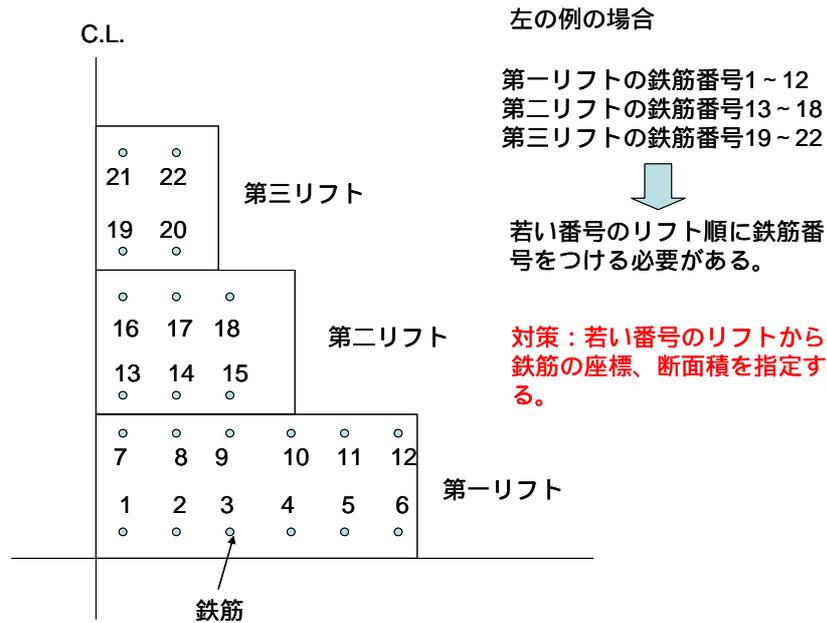


図-6.13 鉄筋の入力順番に関する制約

第 1 リフトから行われなければならない。第 1 リフトの鉄筋入力完了した後、第 2 リフトの鉄筋入力を行っていく。そして、第 3 リフト、第 4 リフト...と鉄筋入力を続ける。

続いて、「強度設定」(図-6.14)をクリックし、強度設定を行い、そして、「拘束条件(外部拘束係数)」(図-6.15)をクリックし、外部拘束係数の入力を行う。これらの詳細は第 3 章 CP ひび割れ幅法の(5)強度データの入力(pp.31-32)および(6)外部拘束係数の入力(pp.32-34)に記しているののでそちらを参照されたい。

続いて、「ハイブリッド用データ」をクリックする。これは、ハイブリッド CP/FEM 法専用ボタンであり、JCMAC2 の Ver.1.20 以降にしか追加されていない。クリック後、図-6.16 に示す画面が表示される。

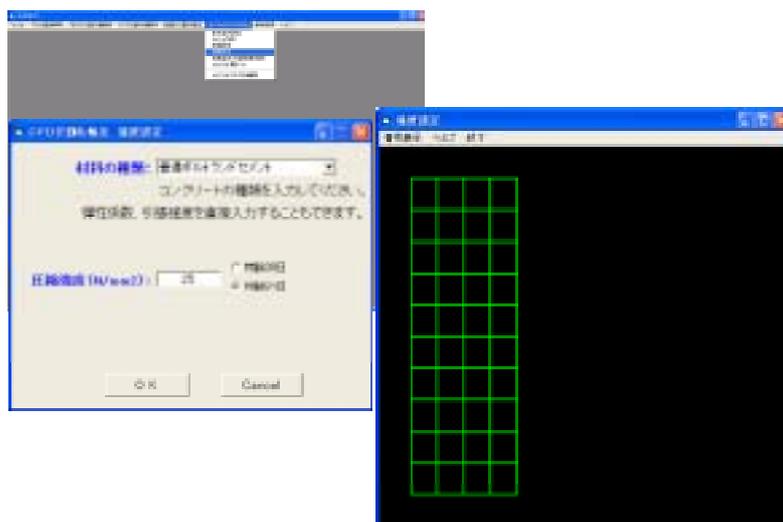


図-6.14 強度設定入力画面

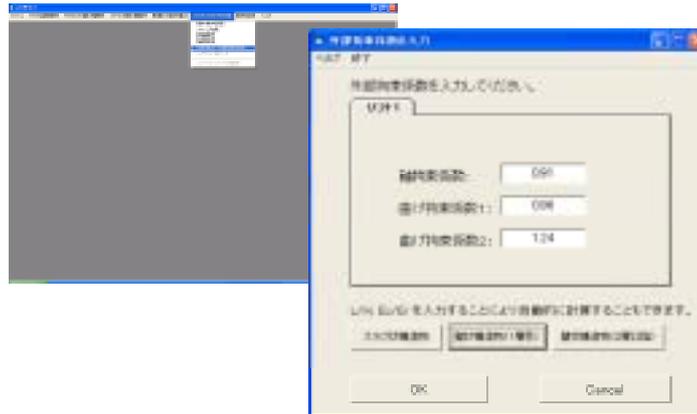


図-6.15 外部拘束係数の入力画面

ハイブリッド用データ入力画面では、長手方向領域長さの半分、長手方向領域(半分)の分割数、繰り返しループの最大回数、リフト毎のコンクリートのポアソン比および Joint 要素特性を入力する。

長手方向領域長さは図-6.16 中のイラストで定義される長さであり、実際の入力は、その長さの半分の値を入力する。長手方向の分割数は、3~5 ぐらいが限界である。

先にも述べたが、本ハイブリッド CP/FEM 法には、ひび割れや鉄筋との付着の影響が考慮されており、剛性方程式は非線形となっている。そのため、解析領域内の力の釣り合いを満足させるために繰り返し計算を必要とする。不平衡力が等価節点力に比べ十分小さくなる(プログラム内では不平衡力が等価節点力のノルムの 0.5%以下になる)まで、この繰り返しを必要

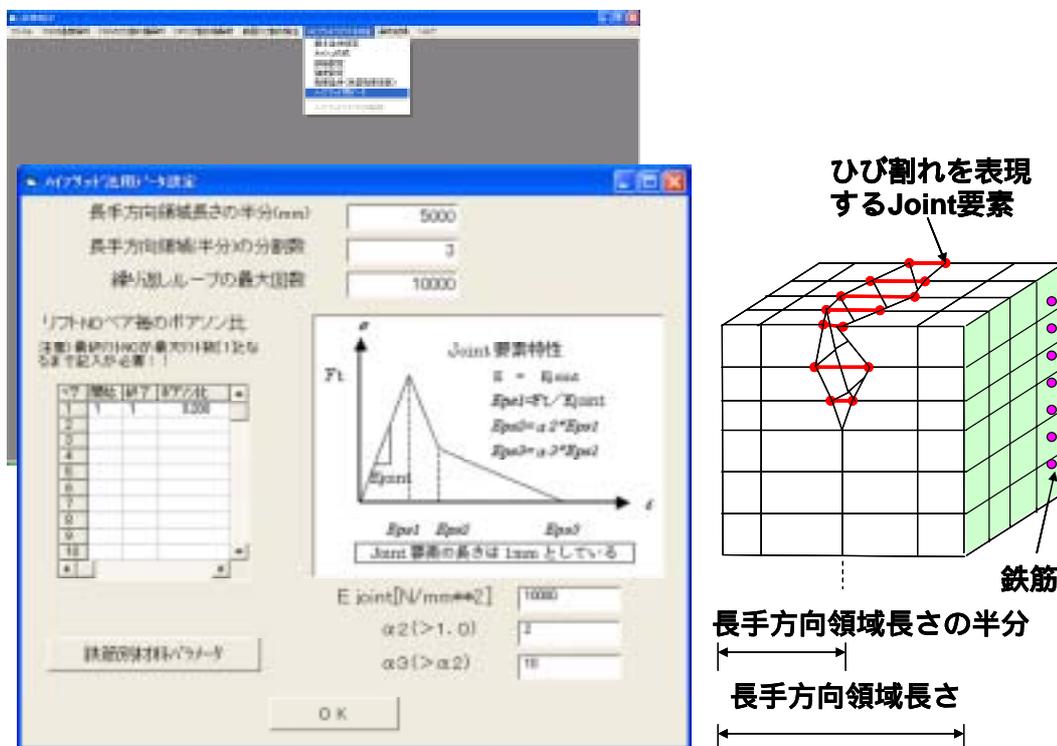


図-6.16 ハイブリッド用データ入力画面

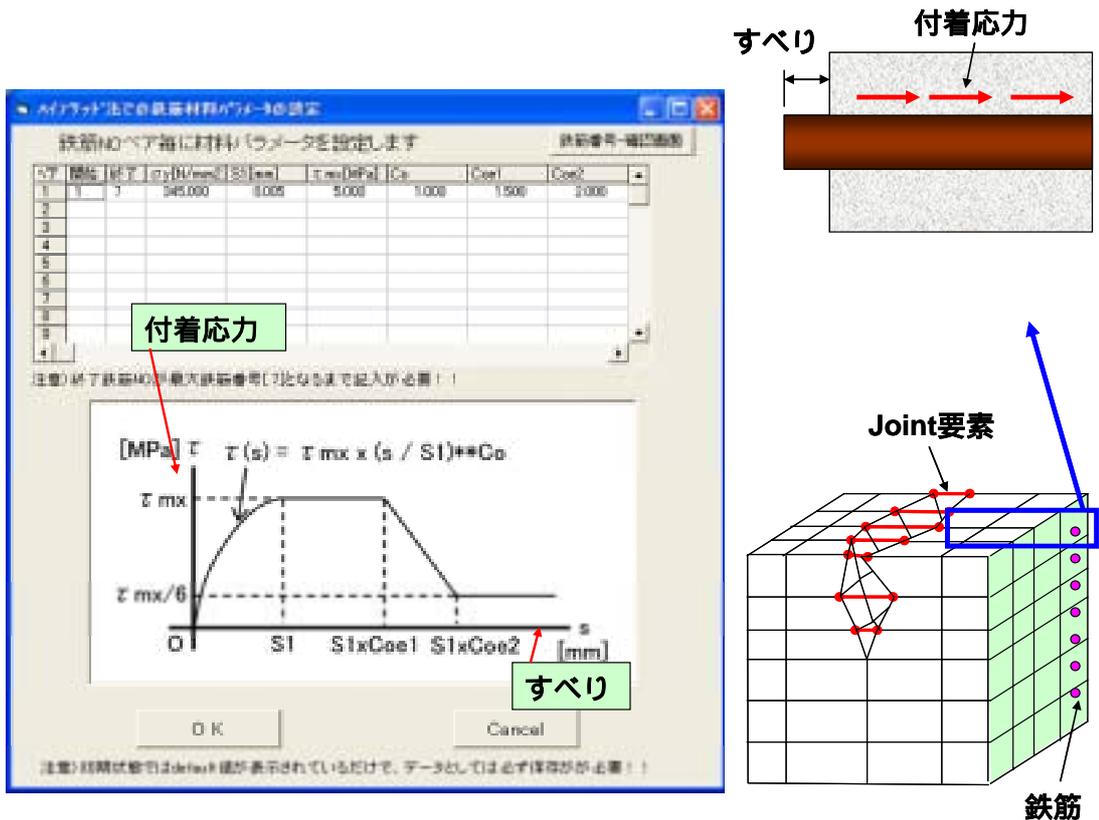


図-6.17 鉄筋材料パラメータ入力画面

とするのであるが、一般的には、この繰り返し回数は解析条件によって異なり、数回で収束することもある。何十万回繰り返しを行ったとしても収束しないと判断されないこともある。繰り返しループの最大回数とは、繰り返しを打ち切る回数を意味している。通常、この数字を大きくすればするほど、力の釣り合いは十分満足される可能性が極めて高くなる一方で、計算時間が極めて大きくなるという欠点がある。最大繰り返し回数を 5000 程度に設定しておけば、ひび割れ幅の解の精度としては充分であると思われる。

コンクリートのポアソン比の大体の目安は 0.1 ~ 0.2 である。

ハイブリッド CP/FEM 法では、ひび割れ幅を Joint 要素で表現している。よって、Joint 要素の応力ひずみ関係をここで指定している。Ejoint は Joint 要素の弾性係数である。これは、通常はひび割れが生じる材齢におけるコンクリートの弾性係数を入力することが望ましいが、本プログラムではデフォルトで 10000N/mm<sup>2</sup> となっている。その他のパラメータとして、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  があるが、これらは joint 要素の軟化勾配を規定するパラメータであり、デフォルトでそれぞれ 2 と 10 となっている。これらの値は特に変更する必要は無いと思われる。

図-6.16 中の「鉄筋別材料パラメータ」をクリックすると、図 6.17 の画面が現われる。ここで、鉄筋とコンクリートとの付着特性を表すパラメータおよび鉄筋の強度特性を入力する。鉄筋ナンバーペア毎に入力する。y は鉄筋の降伏強度(N/mm<sup>2</sup>)である。S1、mx、co、coe1、coe2 は図 6-16 中の付着構成則のイラスト中に定義されているパラメータである。鉄筋の降伏強度以外のパラメータについては、その値の概略がわかっていない場合にはデフォルトの値を用いて良いと思われる。より正確な解析を実施するためには、実験などによりこれらのパラメ

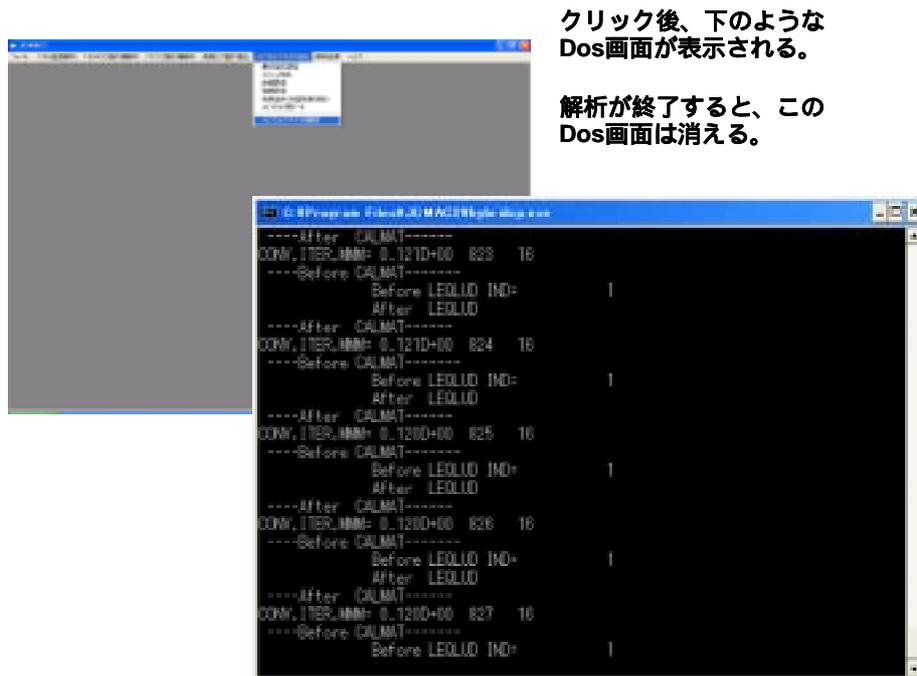


図-6.18 ハイブリッド CP/FEM 解析画面

ータの測定を行うことが望ましい。

以上で、ハイブリッド CP/FEM 法によるひび割れ解析の入力は完了し、ハイブリッド CP/FEM 法によるひび割れ解析が実行可能となる。解析を実行するためには、「**ハイブリッド CP/FEM 法解析**」をクリックする。他の解析とは異なり、クリック後黒い画面(Dos 画面)が現われる(図-6.18)。この Dos 画面が消えると、解析が終了する。

## 6 - 2 - 5 解析結果の出力

ひび割れ幅解析が終了した後は、「解析結果」をクリックし、解析結果をグラフ化する。なお、現在のバージョンで用意されているグラフは、「材齢とコンクリートの応力の関係」、「材齢と鉄筋応力の関係」、「材齢とひび割れ幅の関係」、「応力分布(色)」、「ひび割れ幅分布(色)」である。

### (1) 材齢とコンクリートの応力の関係の表示

メニューから「材齢とコンクリート応力の関係」を選択し、「プロット設定」 -> 「出力節点設定」を選択するとメッシュ図画表示される(図-6.19 下左)ので、出力したいコンクリート節点をマウスでクリックし選択する。「描画」 > 「グラフ表示」を選択すると図-6-19 下右の画面が表示される。

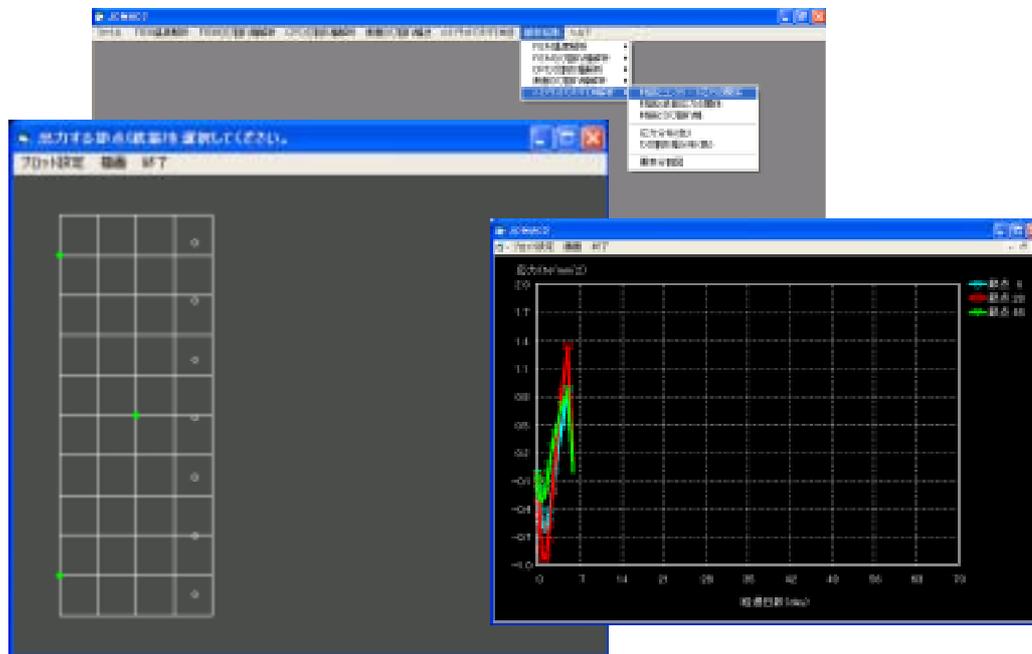


図-6.19 材齢とコンクリート応力の関係出力画面

### (2) 材齢と鉄筋応力の関係の表示

メニューから「材齢と鉄筋応力の関係」を選択し、「プロット設定」 -> 「出力節点設定」を選択するとメッシュ図画表示される(図-6.20 下左)ので、出力したい鉄筋節点をマウスでクリックし選択する。「描画」 > 「グラフ表示」を選択すると図-6-20 下右の画面が表示される。

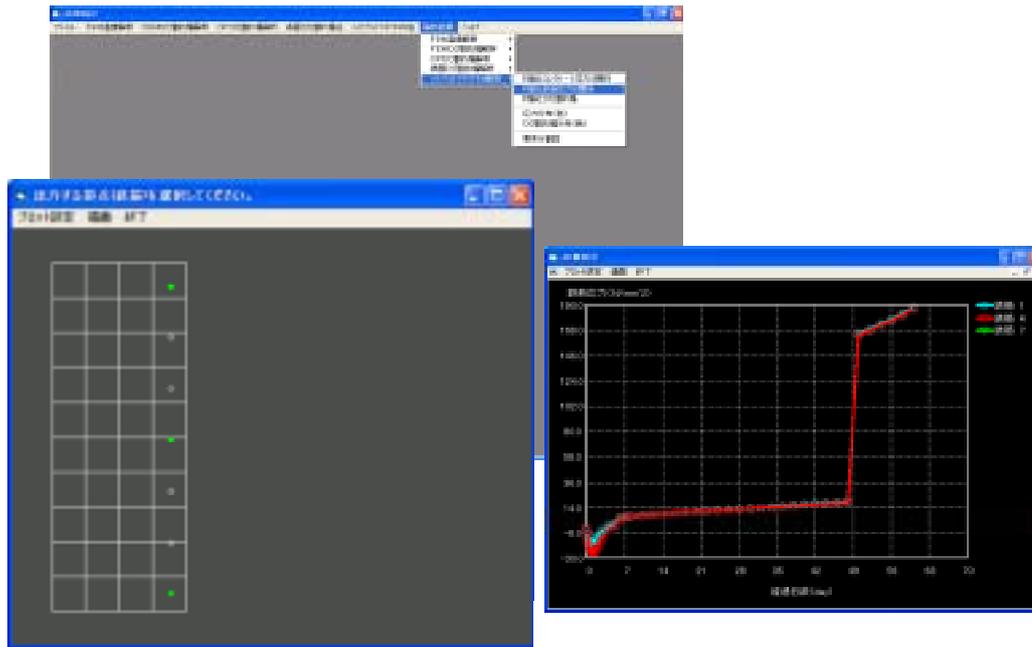


図-6.20 材齢と鉄筋応力の関係出力画面

(3) 材齢とひび割れ幅の関係の表示

CP ひび割れ幅法とは異なり、ハイブリッド CP/FEM 法では、任意のコンクリート節点におけるひび割れ幅が出力される。メニューから「材齢とひび割れ幅の関係」を選択し、「プロット設定」 -> 「出力節点設定」を選択するとメッシュ図画が表示されるので、出力したいコンクリート節点をマウスでクリックし選択する(図-6.21 下左)。「描画」 > 「グラフ表示」を選択すると図-6.21 下右の画面が表示される。本プログラムでは、ひび割れ面に対して対称に解析領域を与えているため、プログラム内で計算されるひび割れ幅は、実際の半分となっているが、出力の際、ひび割れ幅は2倍されているため、出力値は実際のひび割れ幅となっている。

(4) ひび割れ幅分布(色)の出力

メニューから「ひび割れ幅分布(色)」を選択し、続いて「表示ステップ選択」「表示ステップ選択」をクリックする。表示するステップを選んでから「OK」を押すと、図-6.22 下の画面が出力される。

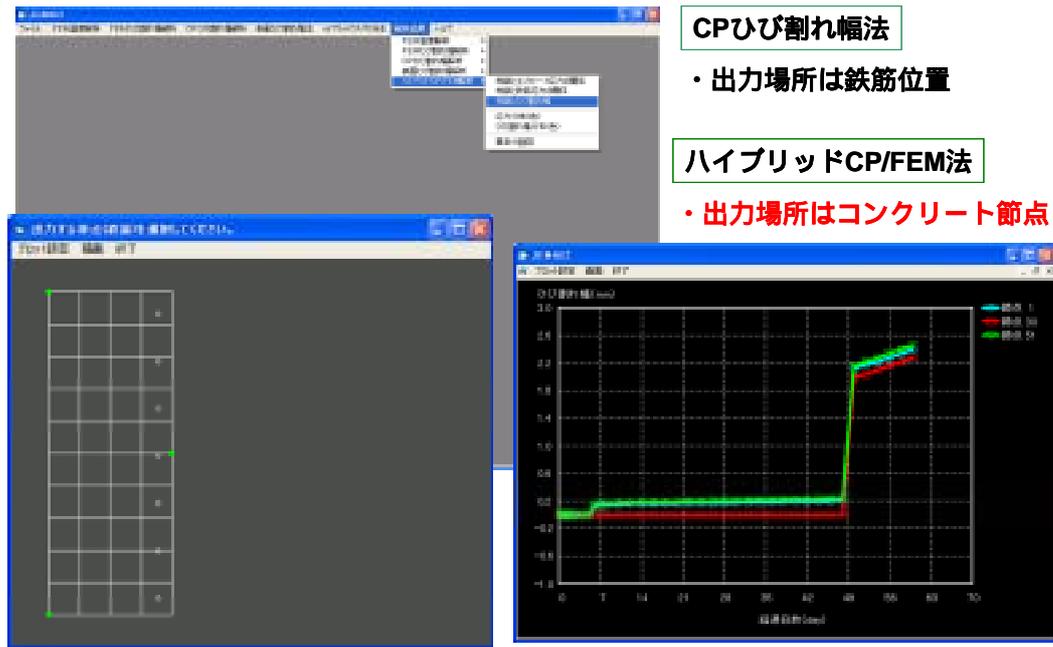


図-6.21 材齢とひび割れ幅の関係出力画面

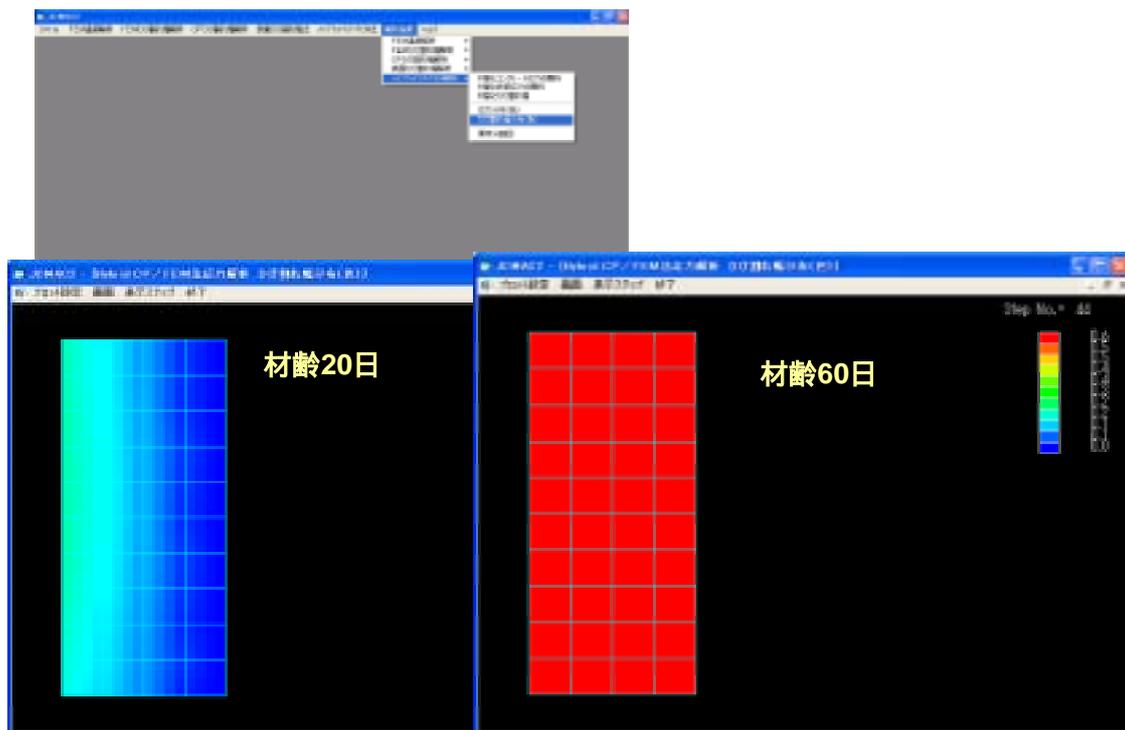


図-6.22 ひび割れ幅分布(色)出力画面