

ハイブリッド CP/FEM 法の開発

Formulation of Hybrid CP / FEM Method

石川 靖晃*, 木全 博聖**, 田辺 忠顕***

Yasuaki Ishikawa, Hiromasa Kimata and Tada-aki Tanabe

* 工博, 名城大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

** 工修, 大同工業大学講師 工学部都市環境デザイン学科 (〒457-8532 名古屋市南区白水町40)

*** 工博, 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

This paper aims to present a new mathematical model called Hybrid CP/FEM Method in order to have more rigorous discussion of initial crack propagation at early age concrete. In this approach, the external restricted forces due to initial stress are assumed to be composed of axial and bending components based on Compensation Plane Method, then, these forces are assumed to be applied to boundary surfaces on focused finite element domain. Applied the proposed model to initial crack propagation analysis and compared to 2D Finite element method, validity of the proposed model for initial crack prediction is discussed.

Key Words: CP Method, Initial Crack, Bond Stress, Crack Width, External Restraint factor

キーワード: CP法, 初期ひび割れ, 付着応力, ひび割れ幅, 外部拘束係数

1. はじめに

材齢初期のコンクリートに発生するひび割れ(初期ひび割れ)は, コンクリート構造物の耐久性の著しい低下を引き起こす要因となる。初期ひび割れの発生を精度良く予測し, ひび割れ抑制対策を合理的かつ適切に講じることが, コンクリート構造物の長寿命化を考える上でも重要となってきた。特に大型構造物や, 設計上ひび割れ制御を厳密に要求されるような重要構造物の場合には, 局所的なひび割れ幅およびひび割れ進展状況を構造物全体の剛性や環境条件を十分に勘案した上で, 詳細にひび割れ抑制対策を検討する必要がある。そのためには, 対象となる構造物を目的に応じて詳細に数理モデル化して, 3次元有限要素で分割して解析を行うことが理想である。しかし, 構造物全体を3次元有限要素で分割して解析する事は計算時間の面で合理的ではなく, 実際問題としてはひび割れ抑制対策を実施する上での数値解析的な検討を十分におこなうことができない。

このような問題を解決する一つの発想としては, 有限要素法において構造物全体の自由度を減らすことが挙げられる。しかしながら, ひび割れ進展解析のような問題では, 自由度を減らすことは単に解の精度を下げるだけで

あり, 解決方法とはならない場合が多い。もう一つの発想としては, 構造物全体系から着目したい領域を抽出してその領域を鉄筋の付着の影響や離散的にひび割れが取り扱えるように極めて詳細に数理モデル化し, 3次元有限要素法等を用いて初期ひび割れの計算をすることが考えられる。この場合, 抽出された領域の境界に作用する初期ひずみによる外力(反力)を適切に評価して導入する必要があるが, この外力の評価方法については全く検討がおこなわれていないのが現状である。もし初期ひずみによる外力が簡単かつ正確に評価できるのであれば, 少ない自由度でかつ計算精度を上げることが可能となるであろう。

本論文では, 温度応力の算定方法として提案されている Compensation Plane 法(CP法)における外部拘束力の考え方から初期ひずみによる外力を評価し, 構造物のひび割れ検討箇所を抽出した領域に作用させることをまず考えた。同時に, 抽出したひび割れ検討箇所を鉄筋付着の影響等を考慮して, 先の外力がスムーズに作用できるような3次元有限要素法による剛性方程式の誘導を試みた。本論文ではこの一連の手法を, ハイブリッド CP/FEM 法と称し, この手法の妥当性について検討を行った。

2. ハイブリッド CP/FEM 法の概念とその定式化

2.1 ハイブリッド CP/FEM 法の概念

マスコンクリートに発生する温度応力解析手法として、Compensation Plane 法 (CP 法) がある。内部拘束作用 (躯体内部が不均一な温度状態となるため自らの変形を拘束する作用) および外部拘束作用 (打設面などが躯体の自由な変形を妨げる作用) を受けるマスコンクリート構造物が、断面内におけるひずみ分布が高さ方向に直線分布をなすことから (平面保持の法則の成立)、外部拘束作用を力学的に等価な軸力と曲げモーメントに置換することによって温度応力を求める方法である^{1), 2)}。CP 法は簡易的な解析手法であるにもかかわらず、FEM と比較してもほぼリーズナブルな解析精度を有しているため、温度応力ひび割れの発生を検討すべき現場において広く採用されている計算方法である。また CP 法に対してひび割れ影響領域と付着喪失領域といった概念を導入し、温度応力だけでなく発生するひび割れ幅の予測を可能とする CP ひび割れ幅法も開発されている^{3), 4)}。しかし、CP ひび割れ幅法は貫通ひび割れを想定しているため、表面ひび割れのような非貫通ひび割れに対する検討は行うことができない。そこで本研究では、CP 法や CP ひび割れ幅法概念の概念を取り入れ、3 次元有限要素による非貫通ひび割れの進展解析を可能とする手法を提案する。

図-1 に示すように、地盤等の拘束体上にコンクリート壁等の被拘束体が打設された場合を考える。そして、被拘束体の一部の体積領域を抽出することを考える。この体積領域の 2 つの境界面は平面保持の法則を満たすと考え。さらに、図-2 に示すように座標系を与えた場合、 x 軸方向の断面形状は一樣であると仮定する。なお、被拘束体には温度変化あるいは乾燥収縮等の初期ひずみ $\Delta\epsilon_0(y, z)$ が生じるものとし、自重などの外力は考慮しないとする。まず、被拘束体が図-3 に示すように、自由な変形を許容すると仮定すると、自由な軸変形 $\Delta\bar{\epsilon}_0$ および $\Delta\bar{\phi}_0$ は、CP 法の概念より次式で表される。

$$\Delta\bar{\epsilon}_0 = \frac{E_c \int_{A_c} \Delta\epsilon_0(y, z) dA_c + E_s \int_{A_s} \Delta\epsilon_0(y, z) dA_s}{EA} \quad (1)$$

$$\Delta\bar{\phi}_0 = \frac{E_c \int_{A_c} (\Delta\epsilon_0(y, z) - \Delta\bar{\epsilon}_0)(z - z_g) dA_c}{EI} + \frac{E_s \int_{A_s} (\Delta\epsilon_0(y, z) - \Delta\bar{\epsilon}_0)(z - z_g) dA_s}{EI} \quad (2)$$

ここで、 EA および EI はそれぞれ境界面の軸剛性および曲げ剛性であり、各時間ステップごとに全断面有効として、

$$EA = E_c A_c + E_s A_s \quad (3)$$

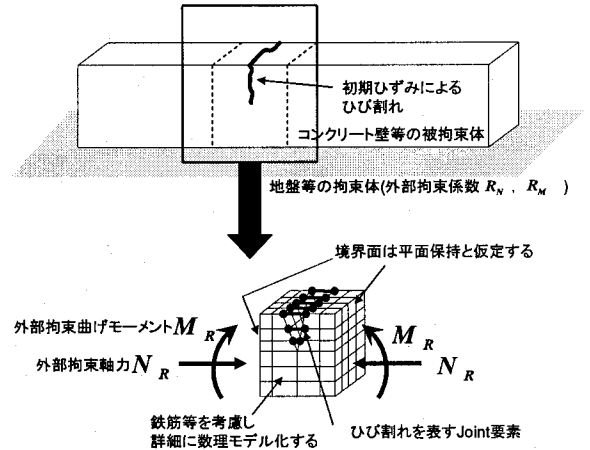


図-1 Hybrid CP/FEM 法の概念

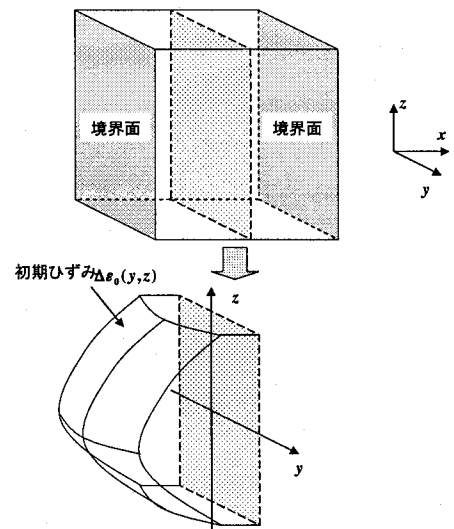
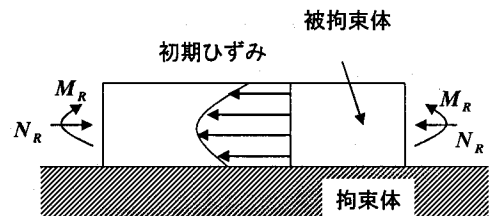


図-2 座標系の定義と初期ひずみ分布の概念図



1) 拘束体が無い時の自由な変形

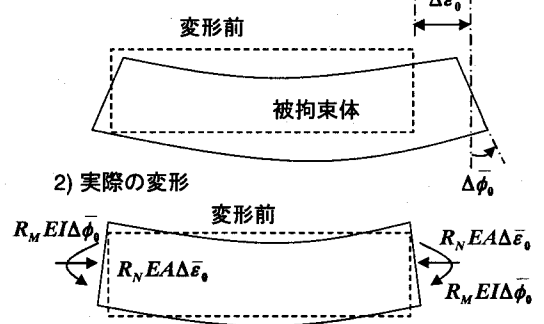


図-3 外部拘束力の考え方

$$EI = E_c \int_{A_c} (z - z_g)^2 dA_c + E_s \int_{A_s} (z - z_g)^2 dA_s \quad (4)$$

を求める。また、

$$z_g = \frac{E_c \int_{A_c} z dA_c + E_s \sum z_i A_{si}}{EA} \quad (5)$$

である。ただし、 E_c および E_s はそれぞれコンクリートおよび鉄筋の弾性係数、 A_c および A_{si} はそれぞれコンクリートおよび鉄筋の面積である。

逐次弾性の間では、図-3 に示すように、外部拘束軸力 N_R および外部曲げ拘束曲げモーメント M_R は、ある断面の初期ひずみによる自由な軸ひずみ変形増分 $\Delta \bar{\epsilon}_0$ および自由な曲率増分 $\Delta \bar{\phi}_0$ を用いて次式で表される。

$$N_R = R_N EA \Delta \bar{\epsilon}_0 \quad (6)$$

$$M_R = R_M EI \Delta \bar{\phi}_0 \quad (7)$$

ここで、 R_N および R_M はそれぞれ軸外部拘束係数および曲げ外部拘束係数である。

ひび割れ事故等で逐次弾性が成立しなくなった場合は、外部拘束力は応力解放によって低減するが、簡便性を考えて、断面剛性は全断面有効とした上で、応力解放による軸ひずみ増分 $\Delta \bar{\epsilon}_r$ および曲率増分 $\Delta \bar{\phi}_r$ を用いて次式で外部拘束力を低減させる。

$$N_R = R_N EA (\Delta \bar{\epsilon}_0 - \Delta \bar{\epsilon}_r) \quad (8)$$

$$M_R = R_M EI (\Delta \bar{\phi}_0 - \Delta \bar{\phi}_r) \quad (9)$$

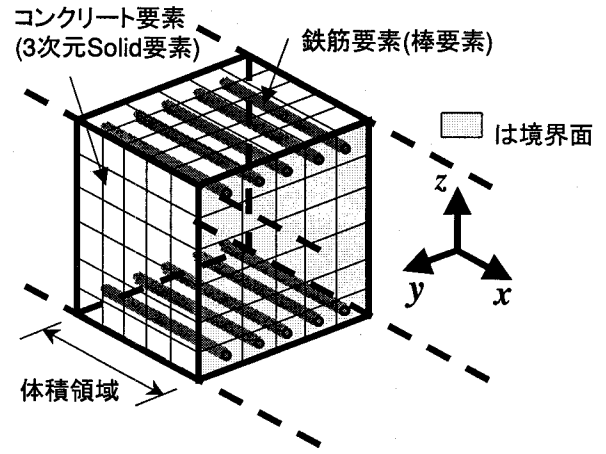
式(6)～(9)より、2つの境界面上に外部拘束軸力 N_R および外部拘束曲げモーメント M_R が外力として作用した体積領域の自由体を得ることができる。厳密にはこの場合、境界面上に外力としてせん断力が生じるが、初期ひずみによるせん断力は一般的には極めて小さいので無視しても差し支えない。

そして、得られた自由体に境界が平面を保持するための制約条件と体積領域が回転等の剛体変形を伴わないような変位境界を与えることにより、一般的な増分型の有限要素解析に帰着させ、解を得ることになる。体積領域の剛性方程式の誘導は次節で行う。

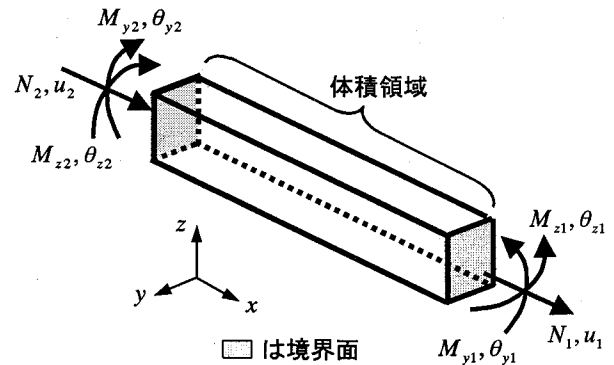
このような考え方により、検討対象領域を厳密に数理モデル化することが可能となり、結果としてより精度良く初期ひずみによるひび割れの発生予測が可能となる。

2.2 体積領域の剛性方程式の誘導

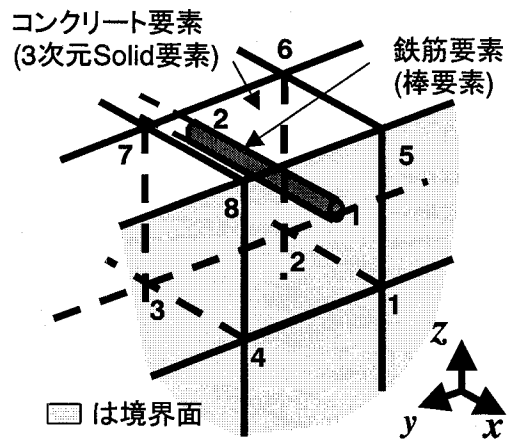
図-4(a)に示すように、体積領域ではコンクリートは3次元 Solid 要素、鉄筋は棒要素で構成されている。体積領域の境界面は、図-4(b)に示すようにはりの自由度を有していると考えられる。加えて、ひび割れはコンクリート要素に二重節点を設け、それらを、長さを持たない joint 要素で結合することにより表現することとする。



(a) 体積領域と境界面の詳細



(b) 体積領域の境界面における自由度



(c) 境界面のある要素の構成節点

図-4 体積領域と境界面の考え方

体積領域の中のそれぞれの要素全てに対して、次式のような剛性方程式が成立する。

$$\{F\} = [K] \{u\} \quad (10)$$

ただし、 $\{F\}$ および $\{u\}$ は、それぞれコンクリート・鉄

筋双方の等価節点力および節点変位ベクトルであり、それぞれ次式で表すことができる。

$$\{F\} = \{f_x^{c1}, f_y^{c1}, f_z^{c1}, \dots, f_x^{c8}, f_y^{c8}, f_z^{c8}, f_x^{r1}, f_y^{r1}, f_z^{r1}, f_x^{r2}, f_y^{r2}, f_z^{r2}\} \quad (11)$$

$$\{u\} = \{u_x^{c1}, u_y^{c1}, u_z^{c1}, \dots, u_x^{c8}, u_y^{c8}, u_z^{c8}, u_x^{r1}, u_y^{r1}, u_z^{r1}, u_x^{r2}, u_y^{r2}, u_z^{r2}\} \quad (12)$$

ここで、上付き添え字 c および r はそれぞれコンクリート要素および鉄筋要素を表しており、下付き添え字は座標系を表している。なお、式(11)および式(12)は要素内に一本の鉄筋要素が入っているのみである場合の表現であるが、コンクリート内に複数本鉄筋が配置されている場合は、単に式(11)および(12)の鉄筋節点成分を追加するだけで対応ができる。

また、上述の仮定の元では、要素剛性マトリクス $[K]$ は次式のような形で表現することができる。

$$[K] = [K_c] + [K_r] + [K_{bond}] \quad (13)$$

ここで、 $[K_c]$ 、 $[K_r]$ および $[K_{bond}]$ はそれぞれコンクリートのみの要素剛性マトリクス、鉄筋のみの要素剛性マトリクスおよび鉄筋とコンクリートとの付着剛性を表すマトリクスである。 $[K_c]$ および $[K_r]$ は、有限要素法で一般的に用いられる 3 次元 Solid 要素および棒要素の剛性マトリクスであり、詳細な説明はここでは省略する。また、 $[K_{bond}]$ の詳細は次節で述べる。

一方、体積領域の境界面は、はり要素と同等の自由度を有するが、この自由度を本節では節点 (はり) と称し、境界面が同時に有している 3 次元 Solid 要素の自由度とは区別する。節点 (はり) 要素 $\{u_b\}$ および節点 (はり) 力 $\{F_b\}$ は、次式となる。

$$\{u_b\} = \{u_x^b, u_y^b, u_z^b, \theta_x^b, \theta_y^b, \theta_z^b\}^T \quad (14)$$

$$\{F_b\} = \{f_x^b, f_y^b, f_z^b, M_x, M_y, M_z\}^T \quad (15)$$

変形は微小であることを仮定すると、境界面との変形の適合条件から次式が得られる。

$$u_x^{ci} = u_x^b + h_i \theta_y^b - \ell_i \theta_z^b \quad (16)$$

$$u_x^{ri} = u_x^b + h_1^r \theta_y^b - \ell_1^r \theta_z^b \quad (17)$$

ここで、 u_x^{ci} および u_x^{ri} は境界面に接しているコンクリートおよび鉄筋要素節点の x 方向変位である。上付き数字は節点番号であり、例えばコンクリート要素 (上付き添え字が c) の場合は、図-4(c) のような要素構成節点番号に対しては $i = 1, 4, 5, 8$ の値を取る。 h_i および ℓ_i は、それぞれコンクリート要素節点 i と、節点 (はり) に対する y および z の座標の差である。同様に h_1^r および ℓ_1^r は、それぞれ鉄筋要素節点 1 と、節点 (はり) に対する y および z 座標の差である。式(16)の関係より、 $\{u\}$ を境界面

を構成する x 方向節点変位を除いた節点変位と節点 (はり) から構成される $\{\bar{u}\}$ で表すと次式のようになる。

$$\{u\} = [T_1] \{\bar{u}\} \quad (18)$$

ここで、 $[T_1]$ は境界面に接している体積領域の節点変位と、節点 (はり) を含めた境界面を構成する節点変位を関連付けるためのマトリクスである。

また、境界面の x 方向に対する軸力および y 軸 z 軸回りのモーメントの釣り合い条件から、次式が得られる。

$$f_x^b = f_x^{c1} + f_x^{c4} + f_x^{c5} + f_x^{c8} + f_x^{r1} \quad (19)$$

$$M_y = f_x^{c1} \cdot h_1 + f_x^{c4} \cdot h_4 + f_x^{c5} \cdot h_5 + f_x^{c8} \cdot h_8 + f_x^{r1} \cdot \ell_1^r \quad (20)$$

$$M_z = -f_x^{c1} \cdot \ell_1 - f_x^{c4} \cdot \ell_4 - f_x^{c5} \cdot \ell_5 - f_x^{c8} \cdot \ell_8 - f_x^{r1} \cdot \ell_1^r \quad (21)$$

式(19)～式(21)の関係より、境界面を構成する x 方向節点変位を除いた節点変位と節点 (はり) から構成される外力 $\{\bar{F}\}$ は次式で表される。

$$\{\bar{F}\} = [T_1]^T \{F\} \quad (22)$$

式(18)および式(22)を式(10)に代入すると、境界面を構成する要素に対しては、次式のような要素剛性マトリクスが得られる。

$$\{\bar{F}\} = [T_1]^T [K] [T_1] \{\bar{u}\} \quad (23)$$

式(23)で与えられる境界面を構成する要素の剛性方程式を介して、体積領域の剛性方程式に前節で与えられる外部拘束力 N_R および M_R をスムーズに導入することが可能となる。

2.3 付着剛性の定式化

今、鉄筋を含んだあるコンクリート要素内において、鉄筋と鉄筋に隣接するコンクリート間で付着応力 $\{\tau\} = \{\tau_n, \tau_t\}^T$ が生じ、それに伴い要素節点に付着応力による等価節点力 $\{F_s\}$ が生じ、要素全体でこれらの力が釣り合っているときの状態を考える。要素節点に任意の仮想変位 $\delta\{u\}$ を与え、鉄筋と鉄筋に隣接するコンクリート間に $\delta\{s\} = \delta\{s_n, s_t\}^T$ のすべりが発生した場合、仮想仕事の原理から次式が成立する。ただし、下付き添字 n および t はそれぞれ鉄筋方向に対して垂直および水平方向であることを表している。

$$\delta\{u\}^T \{F_s\} = \int_A \delta\{s\}^T \{\tau\} dA \quad (24)$$

ただし、 A は鉄筋要素の側面積である。

また、すべり増分と付着応力増分の間には適当な付着応力すべりの構成則マトリクス $[D_{bond}]$ を用いることにより、

$$d\{\tau\} = [D_{bond}]d\{s\} \quad (25)$$

の関係が成立する。式(24)および式(25)の二つの式のみでは付着に関する剛性方程式は誘導できない。剛性方程式を誘導する為には、すべり量 $\{s\}$ と要素節点変位 $\{u\}$ とを関連付ける必要がある。ここでは、図-5に示すように、鉄筋節点の近傍に仮想のコンクリート節点を設け、この仮想のコンクリート節点を元々与えてあるコンクリート節点で幾何的に表すことにより、すべり量と要素節点変位を関連付けることにする。最終的にすべり量と要素節点変位との関係は、コンクリートと鉄筋の座標および要素内に与えた局所座標により表現される座標変換マトリクス $[Q]$ を用いて

$$\{s\} = [Q]\{u\} \quad (26)$$

と表される。

式(25)および式(26)を式(24)に代入し、任意の仮想変位について成立するという条件から最終的に

$$\{F_s\} = [K_{bond}]\{u\} \quad (27)$$

が得られる。ただし、

$$[K_{bond}] = \int_A [Q]^T [D_{bond}] [Q] dA \quad (28)$$

である。

式(27)をコンクリート要素と鉄筋要素からなる要素剛性方程式に重ね合わせることで、コンクリートの節点自由度の制約に捕らわれること無しに、コンクリートと鉄筋の付着を厳密に考慮することができる。

3. 付着応力—すべり関係と付着喪失領域の関連に対する解析検討

コンクリートに発生するひび割れを評価する際には、ひび割れ部周辺のコンクリートと鉄筋の付着の関係を考慮することが非常に重要である。コンクリートと鉄筋に大きな応力が発生すると、やがて両者が一体性を失い、すべりを発生させる。付着を失った部分の長さを「付着喪失長さ」と定義しているが、これはコンクリートのひび割れを解析的に評価する上で非常に重要なパラメータとなる。ここでは検討の一例として、最大付着強度と付着喪失長さとの関連性の解析的評価を試みた。

まず、付着応力—すべり関係を CEB 式に準じて図-6のように与え³⁾、図-7に示すような引き抜き試験の解析を行った。解析に用いた材料定数は表-1の通りである。引き抜き試験は付着強度 τ_{max} がそれぞれ1.0、5.0および10.0 [N/mm²]の場合の3通りで実施した。なお、コンクリートは弾性体、鉄筋は完全弾塑性体と仮定した。

解析で得られた引き抜き部における鉄筋応力 σ_s とすべり量 δ との関係を図-8に示す。この関係は次式のように表現することもできる。

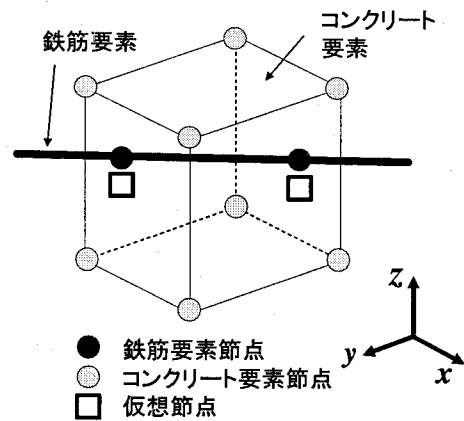


図-5 付着を表現するための仮想節点の導入

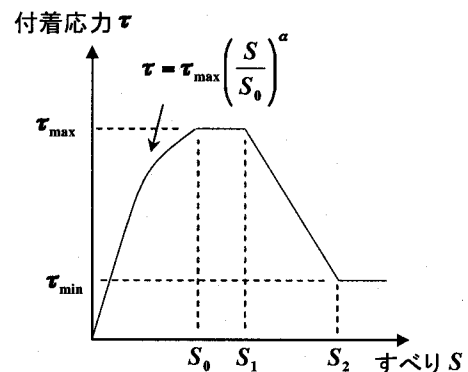


図-6 付着応力—すべり関係

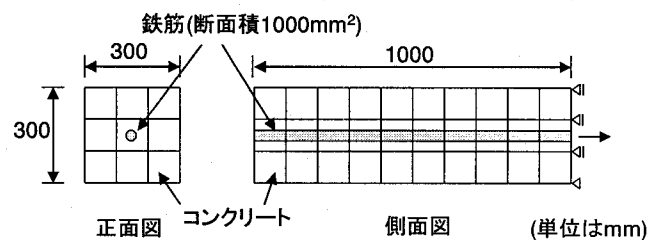


図-7 引き抜き試験解析モデル

表-1 引き抜き試験解析に用いた材料定数

弾性係数(コンクリート)	1.0×10 ⁴ [N/mm ²]
コンクリートのポアソン比	0.16
弾性係数(鉄筋)	2.1×10 ⁵ [N/mm ²]
鉄筋の降伏強度	3.5×10 ² [N/mm ²]
S_0	0.05 [mm]
S_1	1.5 S_0
S_2	2 S_0
τ_{min}	$\tau_{max} / 6$
α	1.0

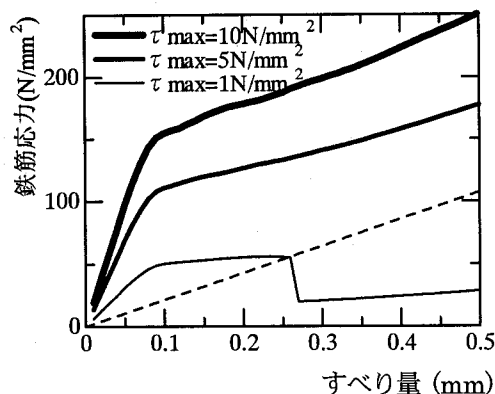


図-8 鉄筋応力—すべり量関係

$$\sigma_s = \frac{E_s}{\ell_s} \delta \quad (29)$$

ただし、 E_s は鉄筋の弾性係数、 ℓ_s はコンクリートと鉄筋との付着喪失長さである。図中の点線は付着喪失長さが 1000 [mm] としたときの鉄筋応力とすべり量との関係を表している。最大付着応力 $\tau_{\max}$ が小さくなる程、 σ_s と δ との傾きは小さくなることから、 $\tau_{\max}$ が 1.0 [N/mm²] の場合では、鉄筋応力—すべり量曲線は、点線の下側に移行している。すなわち、これは付着が小さいために鉄筋全体が滑っていることを示している。図-8 の σ_s と δ との傾きが E_s / ℓ_s となることから、 ℓ_s とすべり量の関係を算定すると図-9 のようになる。最大付着応力が 10 [N/mm²] に着目すると、すべり量が小さいときは付着喪失長さは 100 [mm] 程度であるが、すべり量が大きくなるにつれて付着喪失長さは大きくなり、すべり量が 0.5 [mm] のとき付着喪失長さは 400 [mm] 程度となっている。以上の方法により、付着喪失長さとすべり量の関係は求めることができる。この付着喪失長

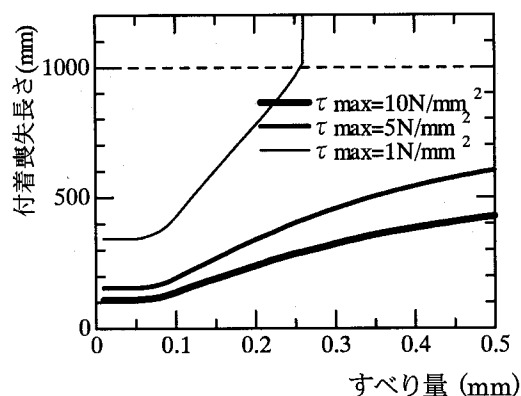


図-9 付着喪失長さ—すべり量関係

さは、次章で述べる有限要素法解析との比較の際に非常に重要なパラメータとなる。

4. 有限要素法との比較による本手法の妥当性の検証

検討対象はコンクリートスラブである。概要図を図-10 に示す。解析対象スラブは高さ 3 [m]、幅 25 [m] であり、奥行きは充分長いとしている。スラブ奥行き方向には、鉄筋が 1 [m] 間隔で配筋されており、高さ方向に図のように 11 本配置されている。

このスラブに対して本手法により温度ひび割れ進展解析を行うことにする。まず、スラブおよび地盤を図-11 に示すように解析モデル化し、スラブ上面を対流境界、地盤底部を温度固定境界として温度解析を実施した。スラブおよび地盤は水平方向に充分長いので、解析モデル側面は断熱境界としている。温度解析に用いた熱特性値は表-2 に示すとおりである。温度解析を実施した後、コンクリート領域の温度履歴を抽出しひび割れ進展解析を実施した。このような流れは CP 法や CP ひび割れ幅法と全く同様である。ひび割れ進展解析に用いた解析モデ

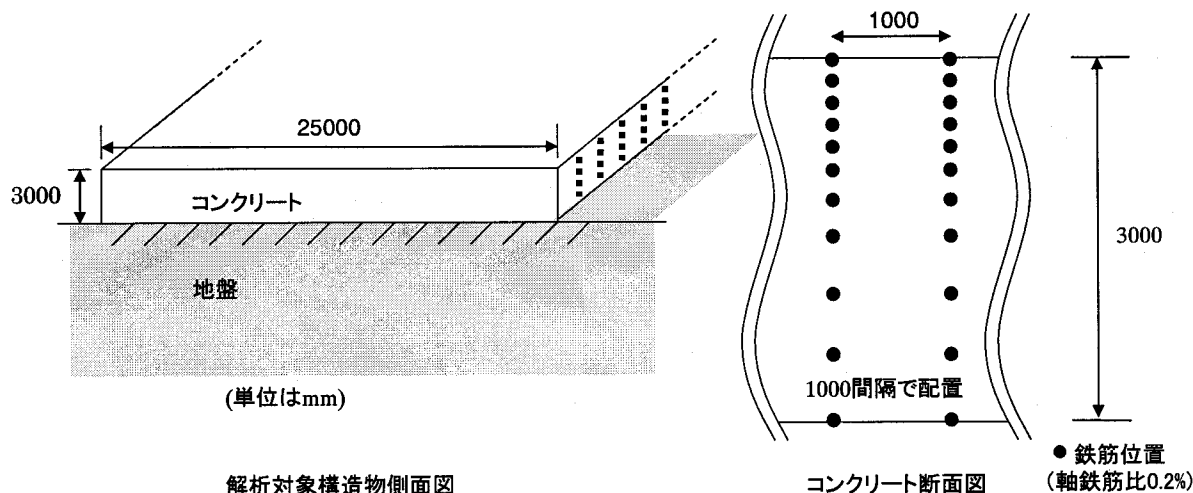


図-10 検討対象スラブ概要図

ルおよび材料値を図-12 および表-3 に示す。解析モデル中央部には2重節点を設けることによりひび割れ幅およびひび割れ進展深さを表現している。また、鉄筋自身にも節点を設け、さらにコンクリートと鉄筋間には3章で述べた付着構成則を導入している。また、ひび割れを表す joint 要素の引張構成則には、一般的な 1/4 モデルを導入している。なお、今回は引張応力が $1.31[\text{N/mm}^2]$ となった場合にひび割れが発生するという条件を設定したが、これは比較対象の FEM 解析の条件に合わせたためであり、コンクリートの引張強度についても圧縮強度やヤング係数と同様に時間依存関数とする方が望ましい。

本節でも外部拘束係数を入力値として与える必要がある。今回のケースでは、 L/H は 8.3、 E_c/E_r は 400 以上であることから、文献 1) を参考にして、 R_N は 0.07、 R_M はピーク前後いずれも 0.6 としている。この条件は極めて外部拘束が弱いことを意味しており、表面部からひび割れが生じることを示唆している。解析で得られたひび割れ幅およびひび割れ深さの経時変化を図-13 に示す。ただし、図中の用語“FEM”とは図-10 のスラブを地盤を含めた状態で、かつ本節で述べたものと全く同じ解析条件で、2 次元有限要素解析により計算した解 2) である。2 次元有限要素解析ではひび割れ部鉄筋は離散鉄筋として取り扱っており、付着喪失長さは $100[\text{mm}]$ としている。このことから、実際に生じるひび割れが $0.1 \sim 0.2[\text{mm}]$ 程度であることと図-9 を考慮すると、本手法における付着構成則の $\tau_{\max}$ は $10[\text{N/mm}^2]$ と考えることができる。他の付着パラメータは表-1 と全く同様に与えた。図-13(a)中のひび割れ幅とは表面部での値である。また、図-13(b)中のひび割れ深さとはスラブ表面からのひび割れ深さを表している。図より、ハイブリッド CP/FEM 法と FEM によって得られたひび割れ進展状況は良く一致していることがわかる。両者の解析共に、ひび割れ幅の最大値は材齢 4 日あたりで $0.2[\text{mm}]$ となっており、ひび割れ深さの進展状況は材齢 3.5 日までに表面部から $600[\text{mm}]$ まで進展している。

以上のことより本手法は、付着応力-すべり関係をはじめとする各種パラメータを正しく評価して導入することにより、ひび割れや鉄筋の付着を考慮に入れた有限要素解析と同等の解析精度を有していることが示された。

5. まとめ

本研究では、マスコンクリートの温度応力の簡易解析手法である CP 法の理論をもとに、コンクリート構造物において特に初期ひび割れ発生に関する検討が必要な箇所を 3 次元有限要素に抽出して詳細にひび割れ発生 の検討を可能とするハイブリッド CP/FEM 法を提案し、その検討を行った。以下に本研究のまとめを示す。

- 1) CP 法における外部拘束力の考え方から初期ひずみによる外力を評価し、3 次元要素の体積領域の境界

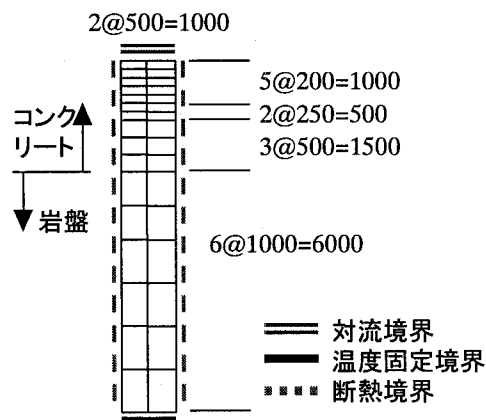


図-11 温度解析モデルおよび境界条件

表-2 温度解析条件

	コンクリート	岩盤
比熱 $[\text{J/kg}^\circ\text{C}]$	920	2070
熱伝導率 $[\text{W/m}^\circ\text{C}]$	2.33	1.40
熱伝達率 $[\text{W/m}^2^\circ\text{C}]$	11.7	11.7
密度 $[\text{kg/m}^3]$	2300	1720
初期温度 $[\text{C}]$	20	20
外気温 $[\text{C}]$	15(一定)	
断熱温度	K	40
上昇式	γ	0.889

表-3 ひび割れ進展解析に用いた材料値

線膨張係数 $(/^\circ\text{C})$	0.00001
設計強度 f'_c $[\text{N/mm}^2]$	$\frac{24t}{4.5 + 0.95t}$
コンクリートの弾性係数 $[\text{N/mm}^2]$	$3500\sqrt{f'_c}$ $t < 3$ 日 $4740\sqrt{f'_c}$ $t \geq 3$ 日
鉄筋の弾性係数 $[\text{N/mm}^2]$	210000
地盤の弾性係数 $[\text{N/mm}^2]$	50
コンクリートのポアソン比	0.20
ひび割れ発生条件	引張強度が $1.31[\text{N/mm}^2]$ 以上
R_N	0.07
R_M (ピーク前)	0.60
R_M (ピーク後)	0.60

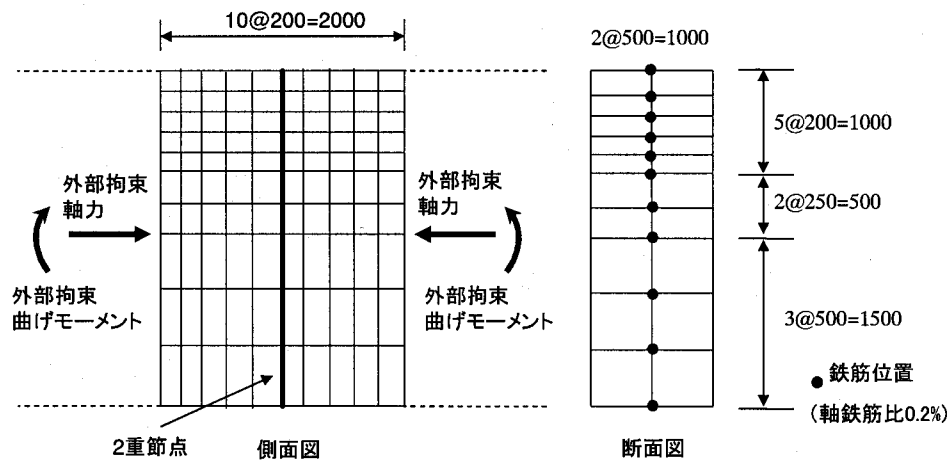


図-12 Hybrid CP/FEM 法によるひび割れ進展解析モデル

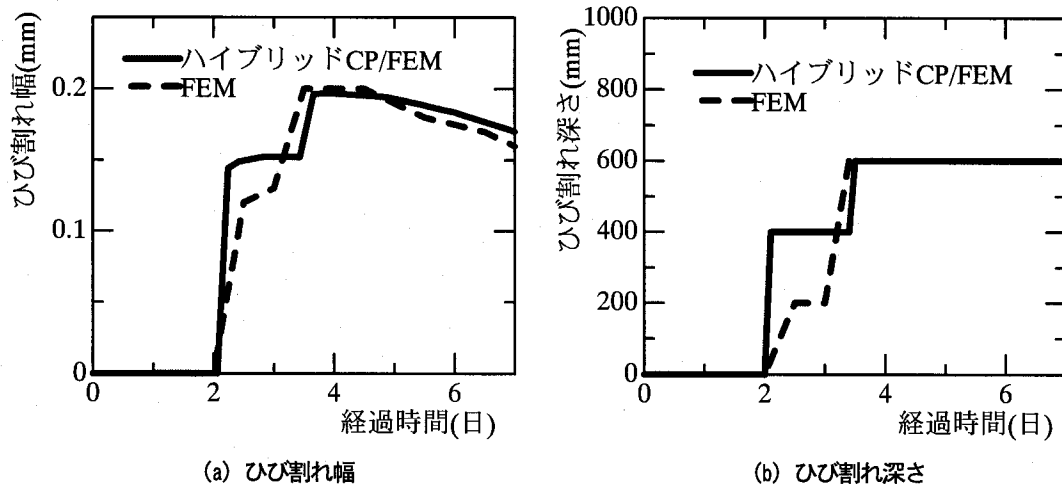


図-13 ひび割れ幅およびひび割れ深さの経時変化

面の自由度をはり要素の自由度と関連付けることによって、3次元有限要素に外部拘束係数 N_R , M_R の概念の導入を可能とした。

- 2) 抽出した3次元のコンクリート要素内に、付着の影響を考慮した鉄筋要素(棒要素)を導入することが可能な剛性方程式の定式化をおこなった。
- 3) コンクリート中に埋め込まれた鉄筋の付着応力-ひずみ関係と付着喪失領域との関連性について解析的な検討を行い、その結果をハイブリッド CP/FEM 法に適用して温度応力ひびわれ進展解析を行った結果、従来おこなわれているひび割れや鉄筋の付着を考慮に入れた通常の有限要素解析と同等の解析精度を有することが確認された。
- 4) ひび割れ進展解析の精度を向上させるためには、コンクリートと鉄筋の付着構成則を適切に評価して導入することが重要である。特に若材齢時の付着構成則については、その実験的検証も含めて、今後の多くの検討が必要である。
- 5) 付着構成則と同時に、要素寸法の決定(長手方向)およびメッシュ分割に対する数値解析への依存性、

また外部拘束係数の決定方法等についても、数値解析的な検証が必要である。

参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学協会：マスコンクリート温度応力委員会報告書，1985年
- 2) (社)日本コンクリート工学協会：マスコンクリート温度応力委員会報告書，1992年
- 3) CEB-FIP Model Code 1990 Design Code, CEB, Thomas Telford Services, pp.83-85, 1991.6
- 4) 石川雅美, 渡辺弘子, 梅原秀哲, 田辺忠顕：CP ひび割れ幅法の表面ひび割れ解析への適用，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.15, No.1, pp.1155-1160, 1993年
- 5) 賀茂友裕, 田辺忠顕：マスコンクリートの温度ひび割れ算定方法に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.11, No.1, pp.457-462, 1989年

(2003年9月12日受付)