

# 有限要素法による3次元 温度ひび割れ解析

森本博昭<sup>1</sup>・小柳 洽<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

本研究は、温度ひび割れに対する実用的な3次元解析モデルについて検討を行ったものである。3次元解析モデルの適用性を検証した上で、解析モデルを組み込んだFEMによりコンクリート壁に発生する温度ひび割れの幅および温度応力の3次元分布性状を明らかにした。また、ひび割れ制御鉄筋量とひび割れ幅との関係についても検討を行った。さらに、2次元FEM解析とCPひび割れ幅法の適用性について明らかにした。

*Key Words: thermal crack, discrete crack model, bond slip model, FEM, extended CP method  
crack control, 3-d analysis, thermal stress*

## 1. はじめに

温度ひび割れは、構造物の耐久性および機能性に悪影響をおよぼすので、設計および施工の段階において十分な配慮が必要である。ひび割れ対策を実施するにあたっては、事前に対策の実施条件とひび割れ幅などとの関連を検討しておくことが必要となる。過去にいくつかの温度ひび割れの解析方法が提案されたが、近年、日本コンクリート工学協会マスコンクリートの温度応力研究委員会（以下、JCIマスコン委員会という）からCPひび割れ幅法<sup>1)</sup>ならびに有限要素法（以下、FEMという）温度ひび割れ解析モデル<sup>2)</sup>が提案された。さて、現時点でのひび割れ解析は、大半がひび割れを2次元的にモデル化するものである。しかし、実際のひび割れは3次元的に変化するものと考えられる。このため、既往の2次元的な解析では、得られたひび割れ幅などの計算結果がどの断面のものであるが不明確となっている。また、2次元FEM温度ひび割れ解析（以下、2次元解析という）では壁厚さ方向の温度分布の取り扱いも問題となる。一方、実務面では経験的に対策の実施条件が決定され、結果として期待した効果が得られなかった場合もある。実効のある温度ひび割れの制御を実現するためには、対策の実施条件とひび割れの制御効果の関係を3次元的に把握することが有効である。さらに、次元温度ひび割れ解析（以下、3

次元解析という）はCPひび割れ幅法などの簡易算定法および2次元解析の精度の検証ならびに改善を計る上でも大きな意義を有する。

本研究は、離散ひび割れモデルを導入した3次元解析法により壁体の温度応力およびひび割れ幅の解析を行い、壁体における温度ひび割れ幅の3次元的な分布性状を実測値と比較しながら明らかにしたものである。また、3次元解析に加えて、2次元解析ならびにCPひび割れ幅法を用いた解析も行い、3次元解析結果との比較を行いながらこれらの適用性と問題点を指摘した。さらに本研究で示した3次元解析法を用いて、鉄筋のひび割れ幅制御効果を明らかにした。

## 2. 3次元解析モデル

本研究で用いた3次元解析モデルは、離散ひび割れモデルを用いたJCIマスコン委員会モデルの基本概念<sup>1)</sup>に添ったものである。図-1に示すように、本モデルではひび割れ位置に定義された2つの節点間の開きによってひび割れが表現される。本研究では、ひび割れの発生予想位置にあらかじめ2つの節点を定義しておき（以下、二重節点という）、ひび割れ発生までは大きな剛性を持つ結合要素で節点間を結合しておく。そして、ひび割れ発生の時点で結合要素の剛性を極めて小さな値とすることによりひび割れを表現する手法を用いた。また、鉄筋の付着すべり

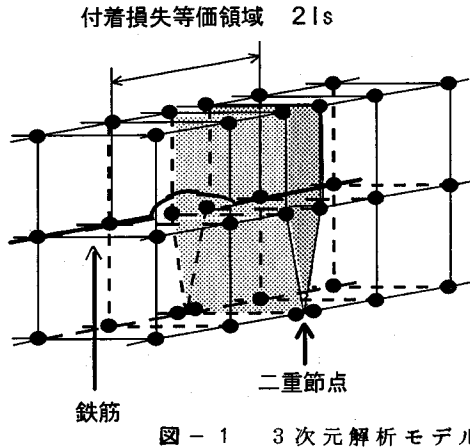


図-1 3次元解析モデル

は、ひび割れ面から一定の区間に付着が全く無い領域を設けることによりモデル化する。この付着無し領域は、付着喪失等価領域1.として定義されている。コンクリートならびに鉄筋の構成則は弾性構成式を用いた。

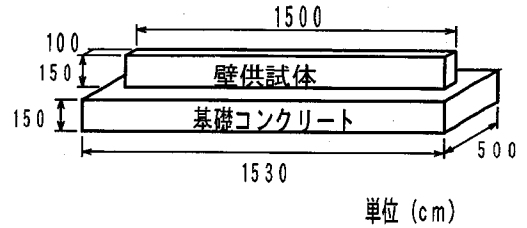
### 3. FEMによるひび割れ解析手順

3次元解析は、図-1の解析モデルを導入したFEMを用いた。2次元解析では図-1のモデルを2次元化したモデルを用いた。ひび割れ解析の手順<sup>2), 3)</sup>は次のようである。

- ①いくつかのひび割れ発生予想位置を図-1のようにモデル化する。二重節点間は極めて大きな剛性を持つ結合要素で連結しておく。
- ②温度応力の計算を増分的に進めていく。
- ③各時間ステップにおいて、二重節点回りの温度応力と引張強度を比較する。温度応力が引張強度を上回った場合は、その節点の連結要素の剛性を極めて小さくしてひび割れを表現する。
- ④ひび割れ発生にともなう応力の再配分計算を行い、ひび割れ発生後の応力と変形を求める。ひび割れ幅は、二重節点の二つの節点の変位差として算出する。
- ⑤応力再配分により、ひび割れの進展あるいは新たなひび割れの発生があった場合は③、④の処理を繰り返す。

### 4. CPひび割れ幅法

CPひび割れ幅法<sup>1)</sup>は、JCIマスコム委員会から先に提案された温度応力の算定法であるCP法の延長線上に位置する温度ひび割れの算定法である。本方法は、まず、ひび割れの発生にともない応力が緩和される領域(応力解放領域1.と定義されている)



- A: 温度、コンクリート応力
- B: 温度、鉄筋ひずみ
- C: ひび割れ幅
- D: ( $\pi$ ゲージ)
- E: 温度
- F: 温度
- G: 温度

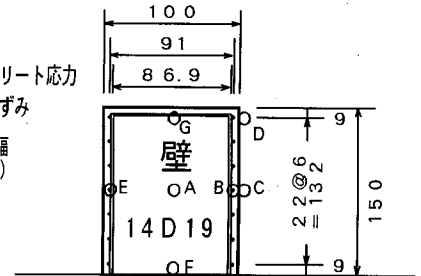


図-2 解析対象構造物

におけるつり合いと変形条件からひび割れ発生時の鉄筋のひずみ増分を算定する。つづいて、構造物全体のつり合いと変形を考慮して、最終的な鉄筋のひずみ増分を求めるものである。ひび割れ幅は、鉄筋のひずみに付着喪失等価領域1.(FEM解析モデルと同一の概念)を乗じて算出される。

### 5. 解析概要

#### (1) 解析対象構造物

解析の対象とした構造物<sup>4)</sup>は、図-2に示すようなコンクリート基礎上の壁体である。基礎と壁の幅、高さ、長さ、それぞれ、5.0m、1.5m、15.3mおよび1.0m、1.5m、15mである。壁長手方向には、D19の配力鉄筋が鉄筋比0.27%で配置されている。壁コンクリートと基礎コンクリートの示方配合を表-1に示す。セメントは、普通ポルトランドセメントで、コンクリートの打ち込み温度は15°Cであった。壁にはコンクリート有効応力計、鉄筋ひずみ計、 $\pi$ ゲージ、熱電対および無応力計が設置され、壁各部のコンクリート応力、鉄筋ひずみ、ひび割れ幅、温度、およびコンクリートの熱膨張係数が計測された。図-2に主な計測位置を示す。また、これらの計測と並行して、コンクリートの強度試験、およびひずみ計と熱電対を埋設した10×10×40cmの供試体を用いた熱膨張係数測定試験も行われた。これらの試験結果を表-2に示す。表中には無応力計による熱膨張係数測定値も合わせて示す。なお、材齢7日に壁中央部付近において壁全高にわたるひび割れが一本発生している。

表 - 1 示方配合

種 別	G <sub>max</sub> (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	A E 減水剤
基礎	25	8±2.5	4±1.0	55.0	42.0	153	278	785	1118	0.556
壁	25	8±2.5	4±1.0	50.0	43.0	160	320	777	1063	0.640

表 - 2 供試体コンクリートの品質管理試験結果

スランプ° (cm)	空気量 (%)	打込み 温度 (°C)	熱膨張 係数 (×10 <sup>-6</sup> /°C)	測 定 項 目	材 齢 (日)		
					3	7	28
8.9	4.1	15.0	5.46 (8.45)*	圧縮強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	129	183	285
				弾性係数(×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	1.52	2.17	3.01

\* ( ) 内の値は、無応力計により算出したもの。

(2) 解析方法

a) 温度解析

温度解析は、壁断面について2次元FEMを用いて実施した。コンクリートの断熱温度上昇特性Q(°C)は、実測値に最も近い値が得られる次式を選定した。

$$Q(t) = 57.9 \{1 - \exp(-0.716t)\} \quad (1)$$

ここに、t：材齢（日）

b) FEMによるひび割れ解析

要素分割は、鉄筋を棒要素で表現している関係上、配力鉄筋のピッチに合わせて行った。また、壁底面におけるコンクリート基礎との付着は完全で、ひび割れ発生後も剥離は生じないものとした。解析で用いたコンクリートの圧縮強度 $f_c$  (kgf/cm<sup>2</sup>)、引張強度 $f_t$  (kgf/cm<sup>2</sup>)および弾性係数 $E$  (kgf/cm<sup>2</sup>)は、表-2の測定値から算定された次式により評価した。

$$f_c(t) = \frac{t}{0.01585 + 0.00295t} \quad (2)$$

$$f_t(t) = \frac{t}{0.1408 + 0.0343t} \quad (3)$$

$$E(t) = \frac{t}{1.137 \times 10^{-5} + 2.914 \times 10^{-6}t} \quad (4)$$

ここに、t：材齢（日）

コンクリートのリラクセーションの影響は、式(2)の値に図-3に示す弾性係数低減率<sup>5)</sup>を乗じた、いわゆる有効弾性係数を用いて近似的に考慮した。コンクリートの熱膨張係数は、無応力計による測定値を用いた。ひび割れの判定は、温度応力の増加速度、実構造物の強度の変動および既往の研究成果<sup>6)</sup>などを参考にして、温度応力が引張強度の80%を上回った時にひび割れが発生するとした。ひび割れ解析における各要素の温度変化（以下、温度データという）は、前述の温度解析の結果を用いた。3次元解析では、壁長手方向の温度変化を近似的に無視して、壁断面に対する2次元の温度データをそのまま壁長手方向に適用した。一方、2次元解析では、温度解析と解析対象断面が異なる（温度解析断面とひび割れ解析断面は直交する）ため、温度解析結果をそのまま温度データとして用いることができない。このため、一般的には断面の平均温度あるいは断面の中心温度が用いられる。しかし、いずれの方法を用いてもひび割れ解析（応力解析を含めて）で壁厚さ方向の温度変化を考慮することが困難であり、これが2次元解析の一つの限界であることが指摘されている。本研究では、2次元解析における温度データの取り扱い法として上記2種類の方法を採用するとともに、平面応力場を仮定して解析を行った。以下、平均温度を用いた解析をケースa、そして中心温度を用いた解析をケースbとする。また、2次元解析モデルにおける付

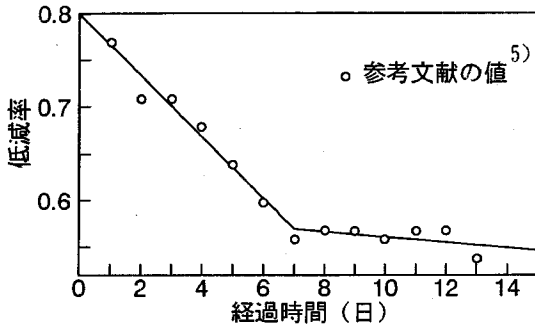


図-3 弾性係数低減率

着喪失等価領域 $l_1$ は、JCIマスコム委員会の推奨値を参考にして15cmとした。

### c) CPひび割れ幅法

CPひび割れ幅法による解析は、JCIマスコム委員会作成のパソコンプログラム<sup>7)</sup>を用いて行った。応力開放領域 $l_2$ と付着喪失等価領域 $l_1$ は、委員会提案を参考にしてそれぞれ $l_2=165\text{cm}$ および $l_1=15\text{cm}$ とした。解析で用いたコンクリートの力学的特性値は、FEM解析と同一のものを用いた。

## (3) 検討事項

### a) 付着喪失等価領域 $l_1$ が計算結果におよぼす影響

図-1に示した解析モデルでは、付着すべりを表現する付着喪失等価領域 $l_1$ の適性値の選定が重要な問題となる。CPひび割れ幅法および2次元解析モデルについては、JCIマスコム委員会から $l_1$ の推奨値が示されている。しかし、3次元解析モデルにおける $l_1$ の適性値については言及されていない。そこで、本研究では、3次元解析モデルについて $l_1$ が計算結果におよぼす影響ならびに $l_1$ の適正值について検討した。解析は、 $l_1$ の値を5、10、15および20cmとした4つのケースを実施した。

### b) 壁体の温度ひび割れ幅の3次元分布性状

温度ひび割れ幅は、壁の高さと厚さの方向に変化すると考えられる。しかし、2次元解析あるいはCPひび割れ幅法では、ひび割れ幅の空間的な変化を厳密に解析することは困難である。そこで、本研究では、3次元解析により壁体の温度ひび割れ幅と温度応力の3次元分布性状ならびに鉄筋応力について検討を行った。さらに実測値との対応から、3次元解析の精度の検証を行った。

### c) 2次元解析およびCPひび割れ幅法の適用性

壁体の2次元解析では、前述のように壁厚さ方向の温度変化が一般的には無視される。このため、ひび割れ幅などに対する内部拘束応力の影響が不明である。一方、CPひび割れ幅法では壁厚さ方向の温度

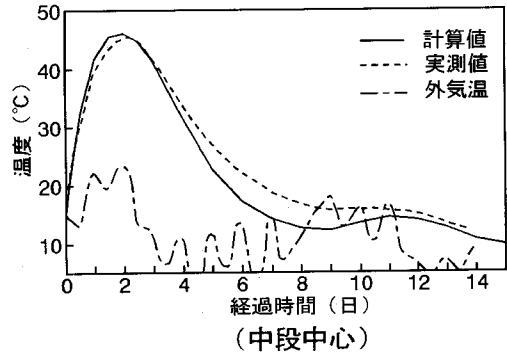
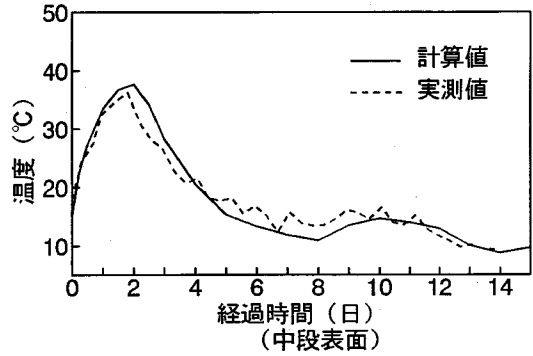


図-4 コンクリート温度

分布は考慮できるが、ひび割れ幅の壁厚さ方向の変化は解析できない。ここでは、3次元解析との比較から、2次元解析およびCPひび割れ幅法の適用性および問題点を明らかにした。

### d) 鉄筋のひび割れ幅制御効果

ひび割れ幅を制御する手段の一つとして、ひび割れと直交する方向の鉄筋、いわゆるひび割れ制御鉄筋を配置することが有効である<sup>8)</sup>。適正な鉄筋量を決定するためには、鉄筋のひび割れ幅制御効果について検討しておくことが必要となる。ここでは、鉄筋比0.27%の場合に加えて、0.6%および0.9%とした場合の3次元解析を行い、鉄筋量とひび割れ幅の関係を明らかにした。

## 6. 解析結果

### (1) 壁体の温度上昇

図-4に、壁中段の中心と表面(図-2のAおよびB点)の温度実測値と計算値を示す。実測から、壁中心では材齢2日でピーク温度46°Cに達する。コンクリート打設温度からの温度上昇量は31°Cである。表面のピーク温度は38°Cであった。中心と表面の温度差は、材齢3日前後で最大値13°Cを示した。計算値と実測値との対応は全般的に良好であり、両者の差は5°C以下である。なお、材齢9日以降、壁体温度の再

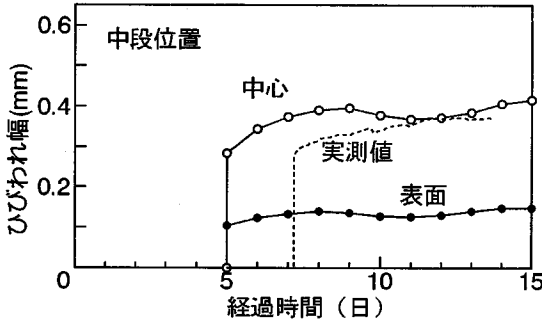


図-5 ひび割れ幅経時変化( $l_s=5\text{cm}$ )

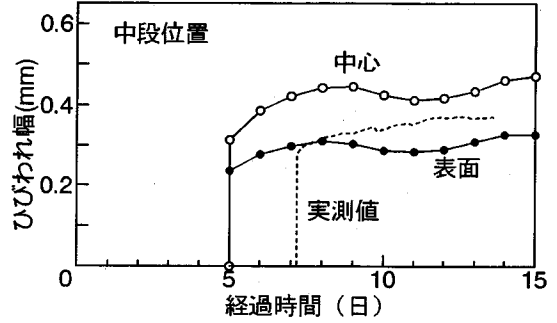


図-7 ひび割れ幅経時変化( $l_s=15\text{cm}$ )

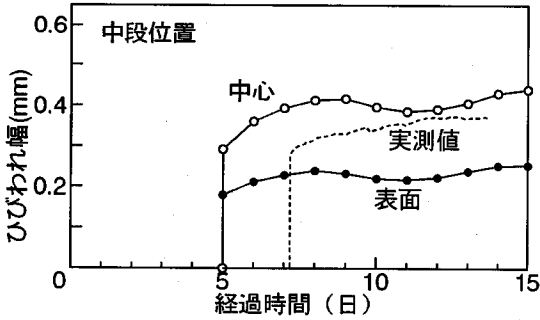


図-6 ひび割れ幅経時変化( $l_s=10\text{cm}$ )

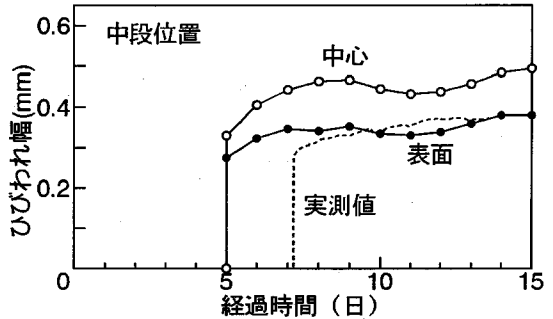


図-8 ひび割れ幅経時変化( $l_s=20\text{cm}$ )

上昇が認められるが、これは外気温の影響と考えられる。

## (2) 付着喪失等価領域Ⅰの影響

### a) ひび割れ幅

図-5~図-8に、壁中段の表面(図-2のC点)でのひび割れ幅実測値ならびに $l_s=5, 10, 15$ および $20\text{cm}$ とした場合のひび割れ幅計算値を示す。実測では発生直後のひび割れ幅は、 $0.27\text{mm}$ 程度であった。ひび割れ幅は、材齢の進行にともないやや増大する傾向を示し、材齢14日で約 $0.37\text{mm}$ となった。一方、計算値に注目すると、いずれの計算ケースにおいてもひび割れは材齢5日に発生し、その後は実測値と同様、若干の増加傾向を示す。なお、材齢11日前後で計算値は一旦減少するが、これは外気温の変動によるものである。また、壁中心のひび割れ幅の方が表面より大きくなっている。これは、中心の方が表面より大きな引張応力が発生することによるものである。従って、壁体では表面にひび割れが発見された場合は、それは壁断面を貫通している可能性が高いものと考えられる。さて、 $l_s$ は付着すべりを表現するもので、たとえば $l_s$ を大きくすることは、付着すべり領域を大きく見込むことを意味する。各図から、 $l_s$ が大きくなるとひび割れ幅も大きく算定されている。

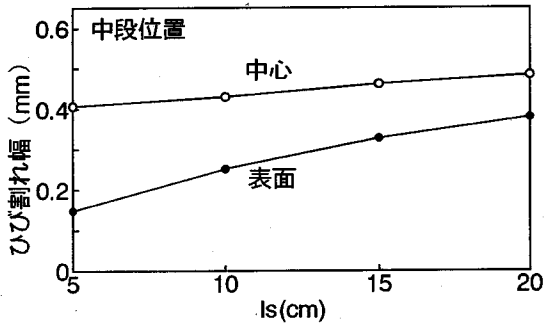


図-9  $l_s$ の値によるひび割れ幅変化

図-9は、材齢14日でのひび割れ幅計算値と $l_s$ の関係を示したものである。図から、 $l_s$ が大きくなれば、いずれの位置においてもひび割れ幅計算値は大きくなっていく。これは、付着すべり領域が大きくなるとひび割れ幅も増大することを示している。また、 $l_s$ が大きくなると中心と表面のひび割れ幅の差が小さくなる。これは、鉄筋のひび割れ幅拘束効果が減少するためである。つぎに、図-5~図-8の各図において表面ひび割れ幅の計算値と実測値を比較すると、実測による壁中段の最大ひび割れ幅 $0.37\text{mm}$ に対して、 $l_s$ を $15\text{cm}$ あるいは $20\text{cm}$ とした時の計算値が実測値と良好に対応していることがわかる。一方、

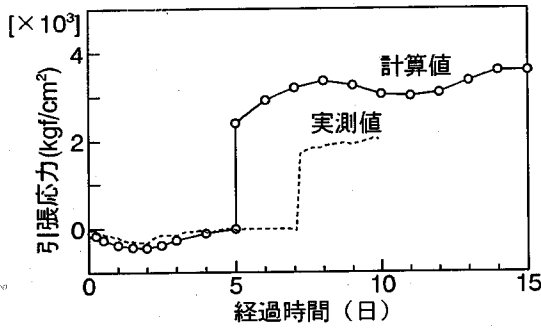


図-10 鉄筋応力経時変化 ( $l_s=5\text{cm}$ )

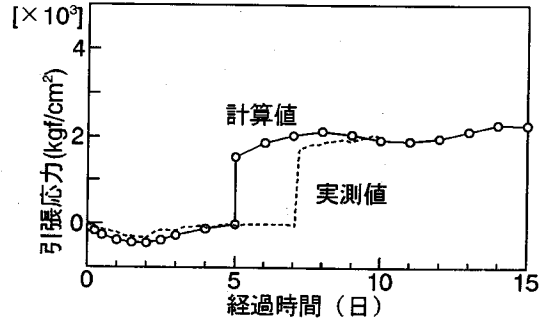


図-12 鉄筋応力経時変化 ( $l_s=15\text{cm}$ )

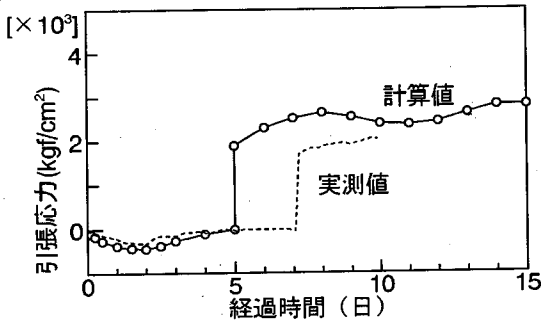


図-11 鉄筋応力経時変化 ( $l_s=10\text{cm}$ )

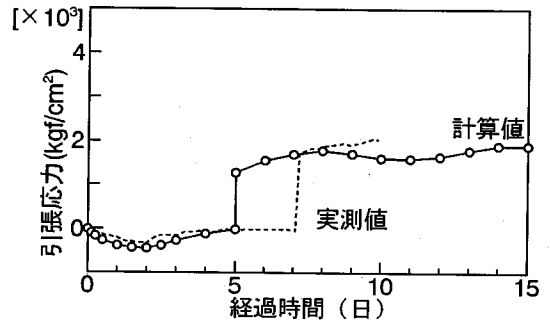


図-13 鉄筋応力経時変化 ( $l_s=20\text{cm}$ )

$l_s=5\text{cm}$ の時は実測値の約40%、 $l_s=10\text{cm}$ の時は約60%程度の値となり、いずれも過小の推定値を与える。以上の結果から、3次元解析モデルにおける $l_s$ の値は15cmから20cm程度が適当であると考えられる。なお、この値はCPひび割れ幅法における $l_s$ の推奨値 $20\text{cm}^{1)}$ とほぼ合致するものである。

#### b) 鉄筋応力

図-10～図-13は、壁中段ひび割れ位置(図-2のB点)の鉄筋応力実測値と各 $l_s$ の値に対する計算値を示したものである。各図から、鉄筋応力の経時変化はひび割れ幅のそれと同様の傾向を示している。また、 $l_s$ が大きくなると鉄筋応力計算値は小さくなっている。これは、 $l_s$ が大きくなると付着喪失等領域における鉄筋の平均ひずみが小さくなるためである。鉄筋応力の実測値は、材齢8日で約 $2100\text{kgf/cm}^2$ である。これに対して、 $l_s=15\text{cm}$ の場合の計算値は約 $2150\text{kgf/cm}^2$ で実測値と良く合致している。 $l_s=20\text{cm}$ とした場合も実測値と良く対応している。このように、鉄筋応力についても、 $l_s$ の値を15～20cmとすると良好な計算結果が得られることがわかる。

#### c) コンクリート応力

図-14は、ひび割れ面から約2m離れた断面の、壁中段(図-2のA点)のコンクリート応力の実測値と $l_s=15\text{cm}$ の場合の計算値を示したものである。計算

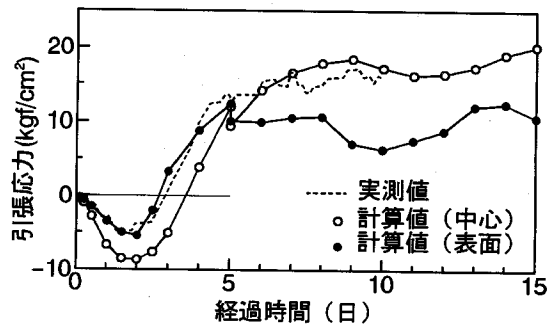


図-14 コンクリート応力経時変化 ( $l_s=15\text{cm}$ )

値については、壁中心と表面の応力を示した。図より、材齢初期の圧縮応力については、実測値にくらべ計算値の方がやや大きい。壁体の温度降下にもない次第に発現していく引張応力については、両者はよく合致している。表面応力の計算値では、材齢5日にひび割れ発生にともなう応力の開放が生じている。コンクリート応力におよぼす $l_s$ の影響はほとんど認められなかった。

#### (3) 温度応力とひび割れ幅の3次元分布性状

図-15は、 $l_s=15\text{cm}$ とした場合の、ひび割れ面から約2mの断面のコンクリート応力を3次的に表示

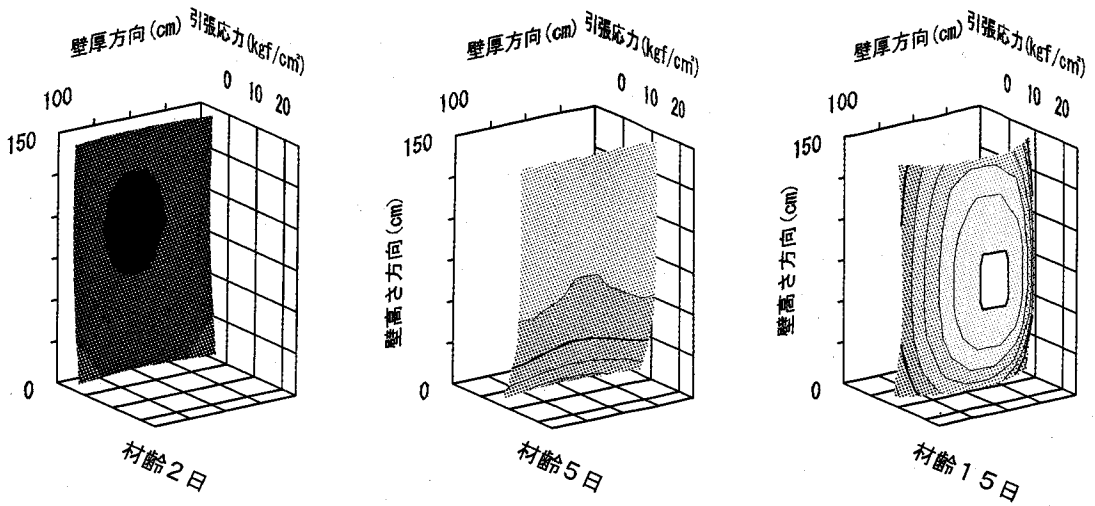


図 - 15 コンクリート応力経時変化 (3次元表示)

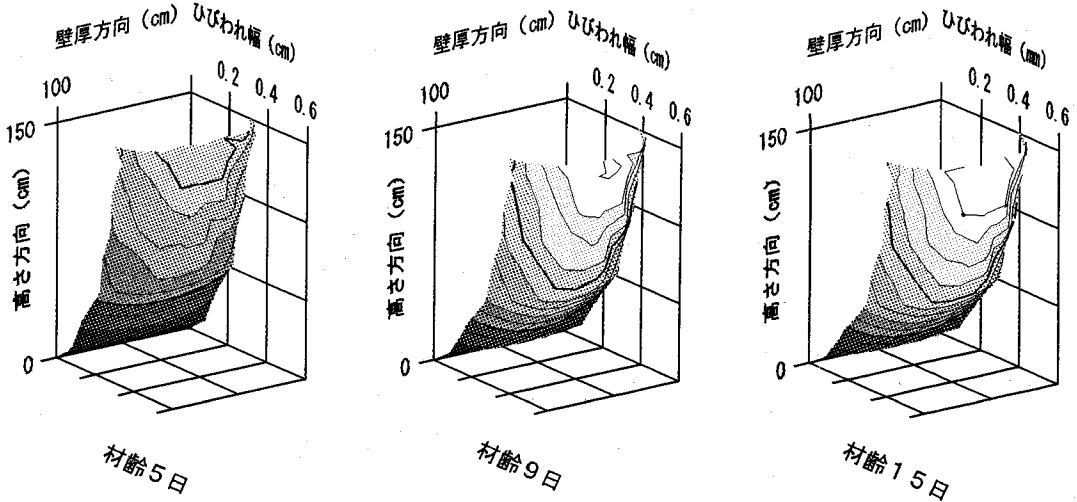


図 - 16 ひび割れ幅経時変化 (3次元表示)

したものである。図は、視点を壁側面に対して右斜め上方に置いた鳥瞰図である。この図より、壁に発生する応力の分布状況を、的確に把握することができる。コンクリートに発生する応力の分布形状は、内部拘束応力と外部拘束応力とが複合して、材齢の進行にともない壁断面に対して凹面から凸面へと変化していく。図-16は、 $l_s = 15\text{cm}$ とした場合のひび割れ幅を示したものである。図により、ひび割れ幅の分布性状を的確かつ視覚的に捕らえることができる。ひび割れ幅は、壁中心上方向に膨らみと極大点を持つ曲面をなしている。すなわち、中心のひび割れ幅は表面にくらべて大きくなる。材齢が進行して

もひび割れ幅の分布形状には変化は認められない。なお、 $l_s$ の値が変化してもひび割れ幅の分布形状には差異が生じなかった。

#### (4) 2次元解析とCPひび割れ幅法の適用性

##### a) ひび割れ幅

図-17に、壁中段(図-2のC点)のひび割れ幅に対する2次元解析のケースa(平均温度使用)およびケースb(中心温度使用)それぞれの計算値を、実測値および3次元解析計算値と合わせて示す。図中、ハッチングで示された部分は、3次元解析による中心と表面のひび割れ幅で囲まれる範囲である。なお、

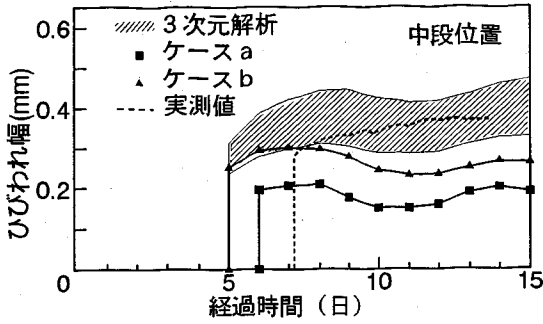


図 - 17 ひび割れ幅経時変化(1s=15cm)

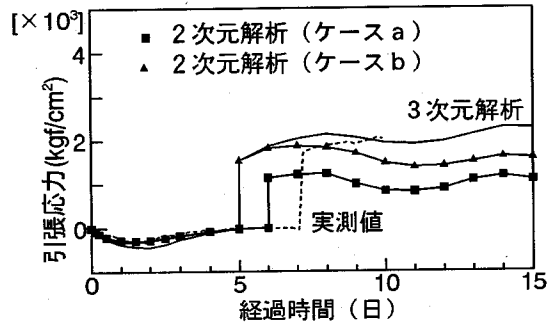


図 - 19 鉄筋応力経時変化(1s=15cm)

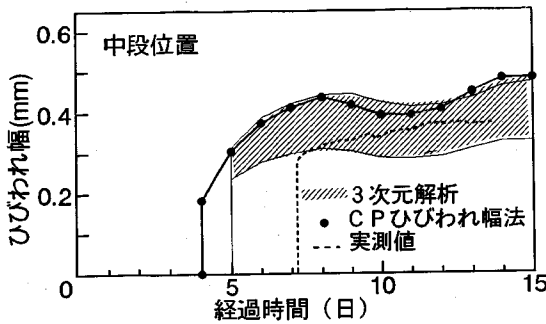


図 - 18 ひび割れ幅経時変化(1s=15cm)

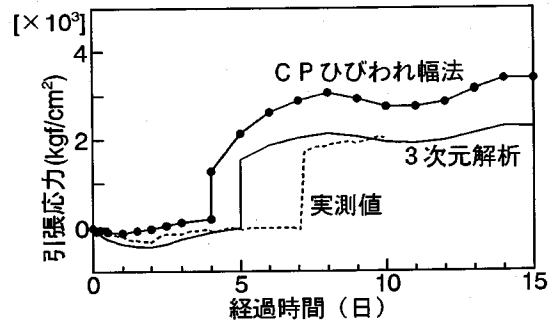


図 - 20 鉄筋応力経時変化(1s=15cm)

本節での3次元解析計算値は、1sを15cmとしたものである。図において、2次元解析のケースaとケースbを比較すると、ケースbの方が0.1mm程度ひび割れ幅を大きく算定している。実測値との対応に注目すると、いずれのケースも実測値よりひび割れ幅を小さく評価している。ケースbの計算値は、ひび割れ発生直後では実測値と比較的良好に合致しているが、材齢の進行にともない差が大きくなる傾向にある。いずれにしても、2次元解析ではひび割れ幅を小さく評価する傾向にあり、1sの値および壁厚方向の温度分布、すなわち内部拘束応力の影響とその実用的な解析法について検討が必要であると考えられる。次に、2次元解析と3次元解析を比較すると、a、bの両ケースとも3次元解析の表面ひび割れ幅よりさらに小さな計算値を与えている。図-18は、壁中段(図-2のC点)のひび割れ幅に対するCPひび割れ幅法の計算結果を示したものである。図から、CPひび割れ幅法は実測値より最大0.15mm程度大きなひび割れ幅を与えるが、全体的には比較的良好に実測値と対応している。CPひび割れ幅法と3次元解析を比較すると、全般的に両者の対応は良好である。CPひび割れ幅法は、3次元解析の表面のひび割れ幅計算値より大きく、むしろ中心のひび割れ幅計算値に近い値を与えている。この原因の一つとして、3次

元解析では壁とコンクリート基礎とは完全付着を仮定しているのに対して、CPひび割れ幅法では応力解放領域では剥離が生じることを仮定していることが考えられる。

#### b) 鉄筋応力

ひび割れ位置(図-2のB点)の鉄筋応力についての2次元解析の計算値を図-19に、またCPひび割れ幅法の計算値を図-20に示す。図-19から、2次元解析のケースb(中心温度使用)の計算値はひび割れ幅と同様に、ひび割れ発生直後は実測値と良好に対応するが、材齢の進行にともない次第に小さな値を示すようになる。2次元解析と3次元解析を比較すると、ひび割れ発生直後を除き全般的に2次元解析は小さな計算値を与える。図-20から、CPひび割れ幅法の計算値は、ひび割れ発生直後においては実測値あるいは3次元解析計算値にくらべやや小さい。しかし、材齢の進行にともない次第に大きめの値となる傾向にある。

#### c) コンクリート応力

図-21に、ひび割れ位置から約2m離れた断面の、中段(図-2のA点)におけるコンクリート応力の2次元解析による計算値を示す。一方、CPひび割れ幅法の計算プログラムは、ひび割れ位置の計算値のみ出力される仕様となっているので、図-22にはひ



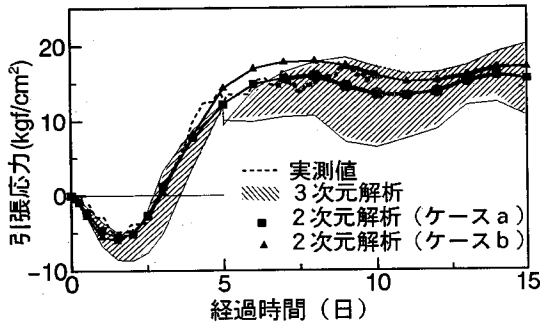


図-2-1 コンクリート応力経時変化(1s=15cm)

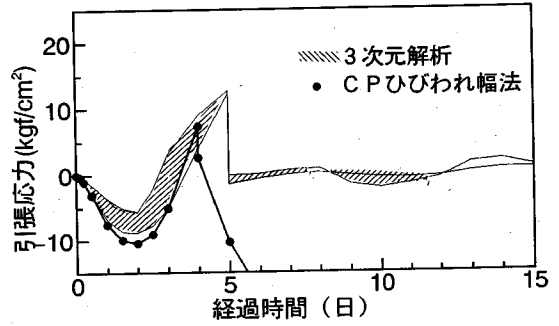


図-2-2 コンクリート応力経時変化(1s=15cm)

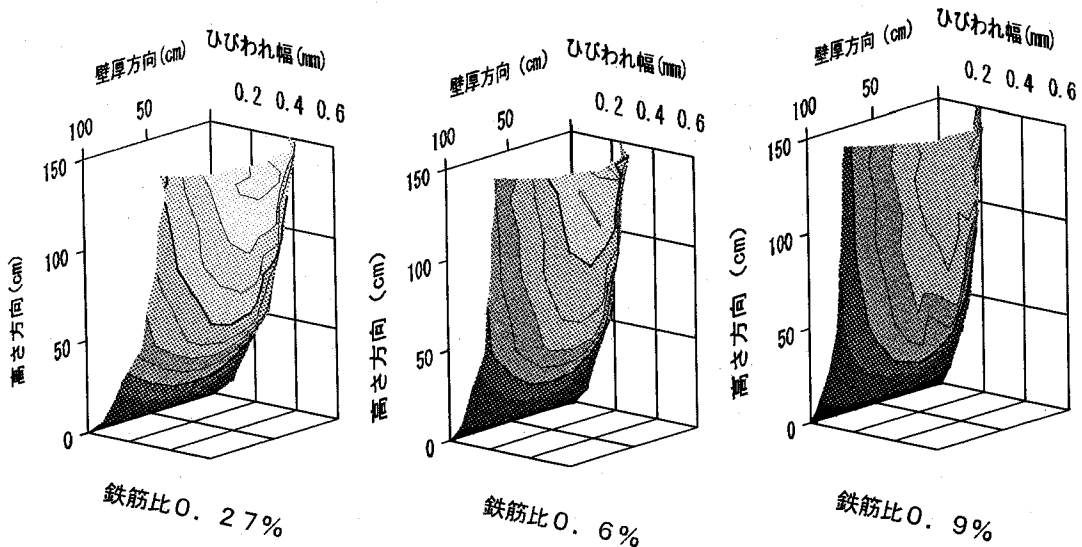


図-2-3 鉄筋によるひび割れ制御効果

び割れ位置におけるCPひび割れ幅法の計算値を示す。なお、ひび割れ位置のコンクリート応力は計測されていないので、図中には実測値は示されていない。図-21から、2次元解析のいずれの解析ケースも実測値とよく合致する結果を与えている。ケースbの方が、ケースaにくらべ約10%高い応力を与えている。ケースbの計算値は、3次元解析の中心応力の計算値と比較的よく合致している。図-22から、CPひび割れ幅法は、3次元解析にくらべやや大きな計算値を与えている。なお、いずれの計算値においても、ひび割れ発生時に応力の開放が生じている。

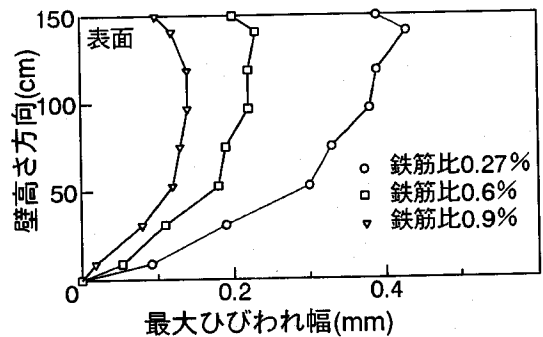


図-2-4 最大ひび割れ幅

#### (5) 鉄筋のひび割れ幅制御効果

図-23は、鉄筋比0.27%、0.6%および0.9%とした場合の、材齢9日におけるひび割れ幅の3次元分布図である。図から、ひび割れ幅は、鉄筋量の増大にともなって全断面にわたり抑制されていくことがわかる。その際、ひび割れ幅の分布形状にはほとんど

変化は認められない。図-24は、表面のひび割れ幅の、壁高さ方向の変化を示したものである。図から、鉄筋のひび割れ幅制御効果は、鉄筋比の増大にともないやや低下していくことがわかる。しかし、最大ひび割れ幅は、鉄筋比0.27%の場合にくらべ、鉄筋比0.6%では58%、鉄筋比0.9%の場合は40%にまで

低減される。すなわち本解析例で言えば、配力鉄筋比としては一般的な0.27%の鉄筋を配置した場合は最大ひび割れ幅が0.47mmとなるものが、ひび割れ制御鉄筋として0.6%以上の鉄筋を配置することにより最大ひび割れ幅を0.2mm以下に制御できることになる。このように、十分な事前検討をもとに適正量の鉄筋を配置すれば、効果的にひび割れ幅を制御することが可能となる。

## 7. 結論

本研究では、3次元ひび割れ解析モデルを導入したFEMを用いて温度ひび割れ幅と温度応力の3次元分布性状を明らかにした。また、解析モデルの特性値 $l_s$ の適正值、2次元解析およびCPひび割れ幅法の適用性、さらには鉄筋のひび割れ幅制御効果についても検討を行った。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

(1) 3次元ひび割れ解析モデルを用いて温度ひび割れ幅、コンクリート応力ならびに鉄筋応力を精度良く推定することができる。解析モデルの特性値 $l_s$ は、ひび割れ幅と鉄筋応力の計算値に大きな影響をおよぼすが、その適正值は15~20cm程度である。

(2) 壁体の温度ひび割れの幅は、壁中心上方向に膨らみと極大点を持つ曲面状に分布する。材齢が進行しても、分布形状は変化しない。 $l_s$ の値も分布形状には影響をおよぼさない。コンクリート応力の分布形状は、材齢に進行にともない壁断面に対して凹面から凸面へと変化していく。

(3) 2次元解析ではひび割れ幅、鉄筋応力ともに、実測値および3次元解析にくらべ小さな計算値を与える。従って、2次元解析では、特に内部拘束応力の影響についての配慮が必要であると考えられる。コンクリート応力については、実測値および3次元解析

の中心応力の計算値と比較的良好に合致する結果が得られた。CPひび割れ幅法は、ひび割れ幅、鉄筋応力およびコンクリート応力のいずれに対しても実測値あるいは3次元解析よりやや大きな算定値を与えた。

(4) 適正量の鉄筋により、ひび割れの幅を効果的に制御することができる。鉄筋量の増大にともない、ひび割れ幅は壁全断面にわたって低減される。本研究の解析例では、ひび割れを効果的に制御するためには、鉄筋比0.6%程度以上の鉄筋が必要であった。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書（温度応力ひび割れ幅算定法の提案），1992。
- 2) 籠橋広文，森本博昭，小柳 治：壁体の3次元温度ひび割れ解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16，No. 1，pp. 1359-1364，1994。
- 3) 高井茂信，森本博昭，小柳 治：コンクリート構造物の3次元温度ひび割れ解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17，No. 1，pp. 1309-1114，1995。
- 4) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針，pp. 127-160，1986。
- 5) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書（マスコンクリートの温度応力推定方法に関する既往の研究成果とその総括），pp. 26-27，1985。
- 6) 狩野敏也，渡辺博志，河野広隆：温度ひび割れ評価のためのコンクリートの引張強度特性に関する研究，土木学会第50回年次講演会概要集第5部，pp. 732-733，1995。
- 7) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリート温度・応力・ひび割れ幅計算用パソコンプログラム，1993。
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書・施工編（平成3年版），1991。

(1995. 11. 20受付)

## THERMAL CRACK ANALYSIS BASED ON PRACTICAL 3-D FEM ANALYSIS MODEL

Hiroaki MORIMOTO and Wataru KOYANAGI

This paper deals with a practical 3-D analysis model for thermal stress and crack. Applicability of the analysis model were fully examined and three-dimensional distribution of thermal crack width and stress of a concrete wall were clarified using the analysis model involved FEM. Effects of the amount of reinforcement on crack width were investigated. Applicability of the 2-D FEM analysis and the extended CP method were also investigated.