

## CP 法と Zoom-up 手法の融合による表面ひびわれ進展解析

名古屋大学大学院 学生会員 ○間宮 一樹  
 大同工業大学 木全 博聖  
 名古屋大学 伊藤 睦  
 名城大学 正会員 石川 靖晃

### 1. はじめに

近年、大型 PC 橋梁の柱頭部はマスコンクリートとなり、温度応力による初期ひびわれに対する注意が必要である。初期ひびわれは構造物の耐久性の劣化を引き起こす主要因であるため、その発生を精度よく予測しひびわれ抑制対策を講じる必要がある。そのためには局所的なひびわれ幅及びひびわれ進展状況を構造物全体のレベルで予測する必要がある、対象となる構造物を3次元有限要素でモデル化し解析することが望ましい。しかし、構造物全体を3次元有限要素で分割して解析を行うことは、計算時間の面で合理的でない。そこで本研究では、構造物全体系から着目したい領域を抽出して、その領域を構造の全体剛性を考慮しながら zoom up することにより、構造物全体系と zoom up された領域の挙動を同時に解析することが可能な初期ひびわれによる3次元ひびわれ解析モデルを構築する。この場合、zoom up された領域の境界に作用する初期ひびわれによる力を適切に評価し導入する必要があるが、本研究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を導入した。

Zoom up 手法に CP 法を融合させることにより、マスコンクリートの任意断面のひびわれ幅、ひびわれ深さの進展を評価することが可能となる。ここでは、本解析手法を用いて温度応力解析を行い、鉄筋比及び外部拘束係数がひびわれ幅及びひびわれ深さの進展に及ぼす影響について解析的検討を行った。

### 2. Zoom up 手法の解析理論

#### 2.1 Zoom up 3次元解析のコンセプト

鉄筋コンクリート構造体の中に発生するひびわれの分布及び進展を局所的に解析するための3次元モデルを図-1 のように構築する。まず、構造物全体系からひびわれ進展を予測したい部分を zoom up することを考え、zoom up する部分を抽出して、その部分を3次元要素 (ソリッド要素) に分割する。zoom up された部分は、ソリッド要素とはり要素が結合されたモデルから構成される。また、ソリッド要素とはり要素の境界面の任意位置に各種パネを取り付けることで、はり部材の曲げ理論における平面保持の法則を満足させ、さらにパネ定数を適当に与えることで、構造物全体の剛性を考慮することが可能となる。このような境界条件を有する3次元局所解析モデルを構造物全体系のモデルに組み込ませて解析する場合、構造物全体と zoom up された領域の力学的挙動を同時に解析的に求めることが可能となる。

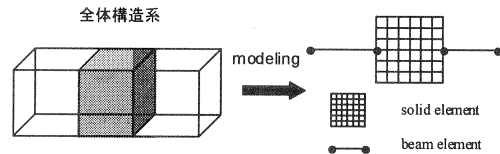


図-1 Zoom-up 手法

2.2 境界面のモデル化

境界面には、図-2 のようにソリッド要素とはり要素が結合されている。そのため、境界面上にあるソリッド要素は、はり部材の基本理論である平面保持の法則を満たす必要がある。そこで、境界面における変形の適合条件及び力の釣合いから、ソリッド要素節点とはり要素節点を関連づけることにより、この平面保持の法則を満足させた<sup>1)</sup>。

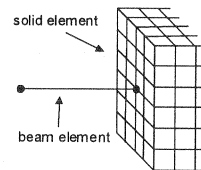


図-2 境界面

### 2.3 付着のモデル化

離散ひびわれモデルを対象として、コンクリート要素内の任意の位置に複数の補強材を挿入することができ、付着性状に基づいたひびわれ幅、ひびわれ間隔等のひびわれ特性を評価することが可能な定式化を行った。これにより、要素分割作業の負担を軽減するだけでなく、3次元的な付着性状を精度よく評価し、ひびわれ解析を効率的に行うことが可能となる<sup>1)</sup>。

### 3 CP法のZoom up手法への導入

Zoom up手法において、境界に作用する力の評価はCP法に基づいて行った。即ち、解析対象となる構造物の外部拘束作用を、力学的に等価な外部拘束軸力及び外部拘束曲げモーメントに置換し、ソリッド要素と結合したはり要素の両端に外部拘束力として与えるようにした。

外部拘束軸力及び外部拘束曲げモーメント  $N_R, M_R$  は次式で求められる。

$$N_R = R_N \Delta \bar{\epsilon}_0 EA \quad (1)$$

$$M_R = R_M \Delta \bar{\phi}_0 EI \quad (2)$$

ここで  $R_N, R_M$  は外部拘束係数、 $\Delta \bar{\epsilon}_0$  は軸ひずみ増分、 $\Delta \bar{\phi}_0$  は曲げ変形増分、 $E, A, I$  はそれぞれコンクリートの弾性係数、断面積、断面2次モーメントである。外部拘束係数の値は、マスコンクリート構造物と拘束体の剛性の比 ( $E_C / E_r$ ) およびマスコンクリート構造物の底面の長さとの高さの比 ( $L/H$ ) によって決定される。1985年にCP法が提案された際に、これらの外部拘束係数の値も示されている<sup>2)</sup>。

また、外部拘束係数はひびわれの発生前後において減少すると考えられる。そのため、式(1)、(2)の  $N_R, M_R$  はひびわれの発生に伴い減少させる必要があるが、本研究では簡便の為、次式でその低減を評価した。

$$N_{R'} = N_R - R_N \Delta \bar{\epsilon}_r EA \quad (3)$$

$$M_{R'} = M_R - R_M \Delta \bar{\phi}_r EI \quad (4)$$

ここで、 $N_{R'}$  及び  $M_{R'}$  はひびわれにより減少した外部拘束力を表し、 $\Delta \bar{\epsilon}_r, \Delta \bar{\phi}_r$  はひびわれに伴う不平衡力によって生じた軸ひずみ及び曲率成分である。

### 4. 本手法による温度ひびわれ進展解析例

#### 4.1 解析対象構造物

図-3に示すようなマスコンクリートを解析対象構造物として、温度応力によるひびわれ発生領域をZoom up手法を用いて解析を行った。対象とするマスコンクリートは図-3に示される構造物の上部分のマスコンクリートである。底面を基盤面(フーチング)に接しているとし、その他の面はコンク

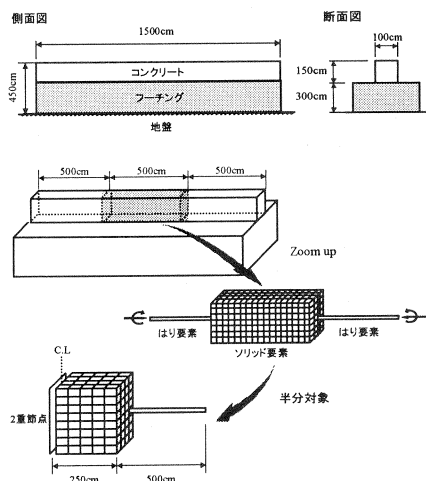


図-3 解析モデル

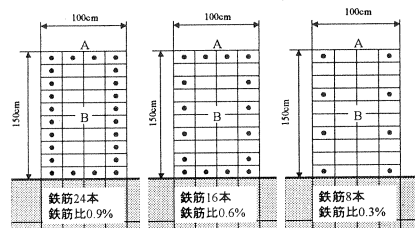


図-4 断面分割及び鉄筋配置

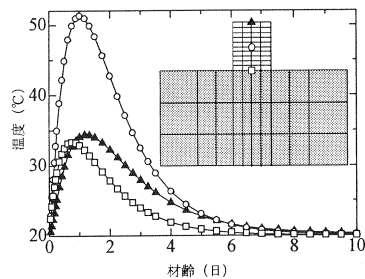


図-5 温度履歴

リートが露出しているとした。また、フーチングは非発熱体とした。解析モデルの寸法は、断面は横1m、高さ1.5m、側方向長さ15mである。図-3のように中央部の5mをzoom up 領域とし、ひびわれは、zoom up された領域の中央部に発生するものとしてひびわれの発生が予測できる面に2重節点を与えた。また、構造物の対称性から解析は構造物の半分の領域を対象とした。ひびわれ進展解析の手順は以下の通りである。まず、マスコンクリートとフーチングを合わせた断面の2次元温度解析を行い、断面の温度分布及び経時変化を算定する。続いて、求めた温度履歴からマスコンクリート部分の断面温度をzoom up したソリッドの断面に一樣に与え、Zoom up 手法による解析を行う。本研究では、特に鉄筋量と軸拘束がひびわれに及ぼす影響に着目した解析ケースとして、図-4に示すような鉄筋比0.3%、0.6%、0.9%の場合の解析を行った。また、外部拘束係数 $R_N$ は、0.1、0.3及び0.5の3パターンとした。 $R_M$ の値はどの解析ケースにおいても1.0を用いた。即ち、曲げに対して完全拘束状態でひびわれ幅の計算を行った。外部拘束係数の値は、本来であれば $E_C / E_r$  および $L/H$ の値によって決定されるが、 $R_N$ の変化による影響を比較するため、本研究においては $R_N$ のみを変化させて解析を行った。

表-1に示す解析条件下での、コンクリート断面の温度解析結果を図-5に示す。図には断面の中心部、基盤面と接する面の中央位置、及び表面中央位置の3点の温度履歴を示している。

4.2 鉄筋量がひびわれ進展に及ぼす影響

前節で示したマスコンクリート構造物の温度応力による表面ひびわれの進展解析を行った。鉄筋比を0.3%、0.6%及び0.9%に変化させて解析を行った。また、このときの外部拘束係数の値は $R_N$ を0.3、 $R_M$ を1.0に固定した。2重節点を与えた断面のひびわれ幅及びひびわれ深さ

進展の様子を図-6に示す。図は断面に生じたひびわれ幅を等高線で示している。それぞれの鉄筋比において、1日目、5日目、7日目の断面のひびわれ幅、ひびわれ深さの進展を示した。図-7には各鉄筋量に

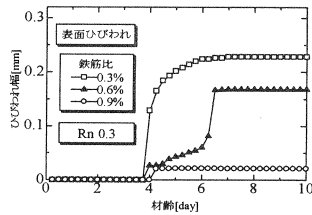


図-7 表面ひびわれ幅の進展

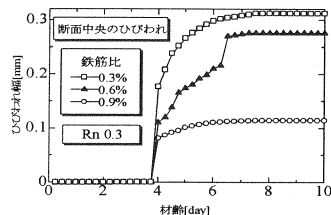


図-8 断面中央のひびわれ幅の進展

表-1 解析条件

コンクリート		
比熱	kJ/kg・°C	1.1
密度	kg/m <sup>3</sup>	2300
熱伝導率	W/(m・°C)	2.7
熱伝達率	W/(m <sup>2</sup> ・°C)	14
断熱温度	K	50
上昇式	γ	1.4
線膨張係数	/°C	10.0×10 <sup>-6</sup>
弾性係数	N/mm <sup>2</sup>	3.1×10 <sup>5</sup> v(1+t) (tは材齢)
ポアソン比	—	0.17
鉄筋		
弾性係数	N/mm <sup>2</sup>	2.1×10 <sup>5</sup>
フーチング		
比熱	kJ/kg・°C	3
密度	kg/m <sup>3</sup>	2600
初期温度	°C	20
温度		
外気温	°C	20

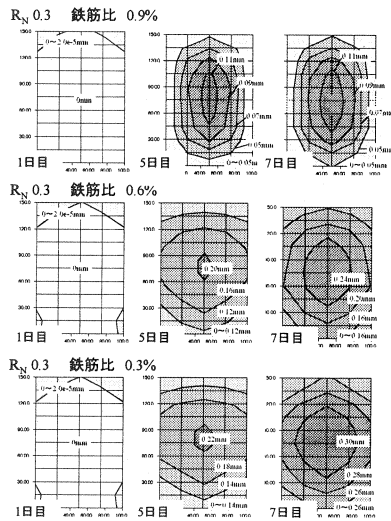


図-6 断面のひびわれ進展の様子

おいての、表面部の点 (図-4 の A 点) のひびわれ幅の進展が示されている. 図-8 には同様に, 断面中央の点 (図-4 の B 点) のひびわれ幅の進展が示されている. これらの結果より, 材齢が若いうちは表面部に微小なひびわれが生じ, 日が経つにつれ断面の内部のひびわれが発生するといったことが示された. また, 鉄筋量が多いほど, 断面に生じるひびわれ幅が小さくなっていることがわかる. これより, 鉄筋とコンクリート間の付着はひびわれ制御に有効であり, 鉄筋量が多いほどその効果が大きくなることがわかる.

### 4.3 軸拘束がひびわれ進展に及ぼす影響

外部拘束係数  $R_M$  の値を 1.0 に固定し,  $R_N$  を 0.1, 0.3, 0.5 と変化させて解析を行った. また, このとき, 鉄筋比は 0.9% に固定した. 2 重節点を与えた断面のひびわれ幅及びひびわれ深さ進展の様子を 図-9 に示す. それぞれの外部拘束係数において, 1 日目, 5 日目, 7 日目の断面のひびわれ幅, ひびわれ深さの進展を示している. 図-10 には各外部拘束係数において, 表面部の点 (図-4 の A 点) のひびわれ幅の進展が示されている. 図-11 には, 断面中央の点 (図-4 の B 点) のひびわれ幅の進展が示されている. これらの解析結果より, 外部拘束係数が大きいほど, ひびわれ幅も大きくなり, かつ急激にひびわれが発生することが示された.

### 5. 結論

以上より以下のことが要約される.

着目したい部位を 3 次元要素でモデル化する Zoom up 手法を用いてひびわれの進展を精度よく評価するとともに, その境界条件を CP 法に基づき評価する新たなひびわれ進展解析手法の提案を行った. 提案した解析手法では, 温度応力によるひびわれ幅, ひびわれ深さの発生と進展を 3 次元的に詳細に検討することができる.

解析により, 鉄筋とコンクリート間の付着はひびわれ制御に有効であり, 鉄筋量が多いほどその効果が大きくなることを示した. また, 外部拘束係数が大きいほど, ひびわれ幅も大きくなり, かつ急激にひびわれが発生することも示した.

### 参考文献

- 1) 伊藤仁志, 石川靖晃, 伊藤睦, 中村光, 田辺忠顕: 初期応力による 3 次元ひびわれ解析及びその効率化, 研究発表会公演概要集, 土木学会中部支部, pp. 525-526, 2002
- 2) 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, 1988
- 3) 石川靖晃, 木全博聖, 石川雅巳, 田辺忠顕: 表面ひびわれ深さの進展を予測する CP ひびわれ幅法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, 2002

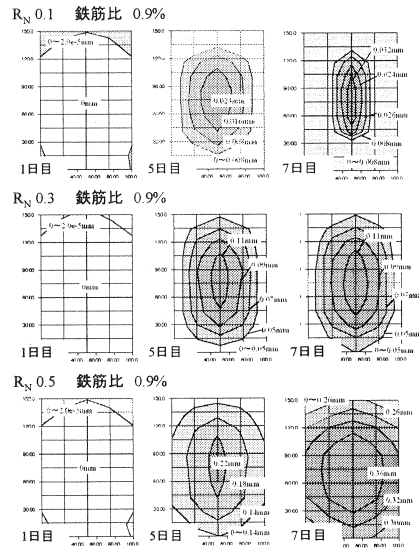


図-9 断面のひびわれ進展の様子

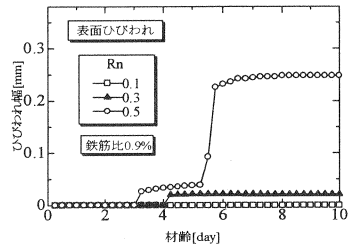


図-10 表面ひびわれの進展

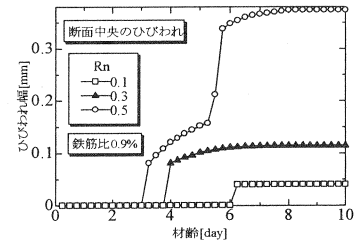


図-11 断面中央のひびわれの進展