

# 台形の応力解放領域を仮定した CP ひびわれ幅法の開発

東北学院大学 学生会員 ○大川徹

東北学院大学 正 会 員 石川雅美

東北学院大学 正 会 員 遠藤孝夫

## 1. はじめに

コンペイセーション・プレーン法（以下 CP 法）は、現在マスコンクリートの温度応力を解析する手法として、最も一般的に使用されている。本手法は、土木学会コンクリート標準示方書にも記載されており、日本コンクリート工学協会からは、CP 法を組み込んだ JCMAC1 と JCMAC2 の 2 種類が市販されている。JCMAC1 は多層リフト打設を考慮して温度応力を計算するものであり、JCMAC2 には、ひびわれ幅およびその経時変化を計算できる CP ひびわれ幅法が組み込まれている。しかしながら、現行の CP ひびわれ幅法には、解析できる構造物の形状に制限があるなど、いくつかの問題点が存在するため、JCMAC1 ほど利用されていないのが現状である。

そこで、本研究では現行の JCMAC2 の問題点を指摘し、改善を施したプログラムを開発し、実際の問題に対する解析を行って、その妥当性を検証した。

## 2. 現行の市販プログラムの問題点

現在の市販プログラムの問題点は以下の 3 つである。

### 1) モデルの形状制限

JCMAC2 では、温度解析は FEM を使い、応力解析は CP ひびわれ幅法を使用している。しかしながら、FEM 温度解析で使用するメッシュと CP ひびわれ幅法の解析で使用するメッシュは、それぞれ別のものとなっている。FEM 温度解析においてメッシュを作成して、温度解析を行うと、温度は各節点で出力される。これに対して、CP ひびわれ幅法では、その理論上、要素の中心温度が必要となる。そのため、節点が要素中心となるようにメッシュが再定義されている。それ故、開口部のある場合、例えば 2 連のボックスカルバートを解析する場合には、CP 要素の面積が正しく計算されないという問題がある。

### 2) ひびわれ判定の複雑さ

ある要素（FEM 要素における節点位置）で、ひびわれが発生した場合、その判断をその都度ユーザが指定する必要がある。そのため、ひびわれ発生位置を容易に特定できないなど、実用性に欠ける部分がある。

### 3) 応力解放領域の限界

ひびわれの発生に際して解放されるコンクリートの応力は、矩形で解放されるものと仮定している。しかしながら、実際にはひびわれが発生する壁部の下端は拘束体によって拘束を受ける。そのため、応力解放領域は上端に向かって徐々に広がる台形の形

になると考えられる。

本研究では、以上の 3 点について改善したプログラムを開発したが、本報では応力解放領域の理論を以下に示す。

## 3. 台形応力解放領域の定式化

図-1.1 に示す台形の応力解放領域の片方のみを取り出し、図-1.2 に示すようにデカルト座標および一般座標  $(\xi, \eta)$  を定める。

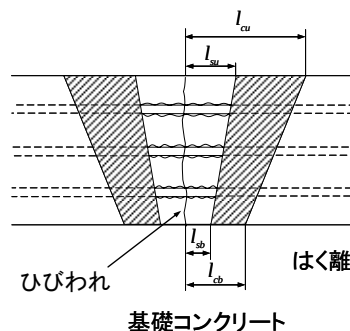


図-1.1 台形応力解放領域

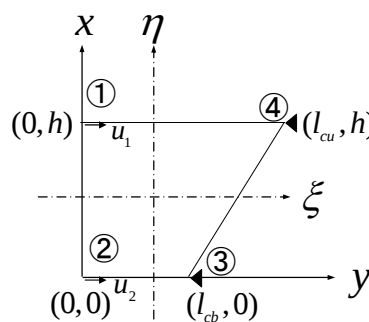


図-1.2 座標表示

この時、任意の点の変位  $u$  は、次式で表せる。

$$u = N_1(\xi, \eta) \times u_1 + N_2(\xi, \eta) \times u_2 \quad (1-1)$$

ただし、

$$N_1 = \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) \quad , \quad N_2 = \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) \quad (1-2)$$

それをもとに、コンクリートと鉄筋のひずみを求める。コンクリートは式 (1-3)、鉄筋は式 (1-4) に示す。

$$\varepsilon_c = -\frac{(1+\eta) \times u_1 + (1-\eta) \times u_2}{l_{cb} + l_{cu} + \eta \times (l_{cu} - l_{cb})} \quad (1-3)$$

$$\varepsilon_s = \frac{1}{l_s} \times [N_1(\xi^*, \eta) \times u_1 + N_2(\xi^*, \eta) \times u_2] \quad (1-4)$$

力の釣り合い式と、ひずみの適合条件から、

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N_0 \\ M_0 \end{Bmatrix} \quad (1-5)$$

ただし、

$$\begin{aligned} a_1 &= E_s \int_{A_s} \frac{N_1(\xi^*, \eta)}{l_s} dA + E_c \int_{A_c} \frac{1+\eta}{l_{cb} + l_{cu} + \eta \times (l_{cu} - l_{cb})} dA \\ a_2 &= E_s \int_{A_s} \frac{N_2(\xi^*, \eta)}{l_s} dA + E_c \int_{A_c} \frac{1-\eta}{l_{cb} + l_{cu} + \eta \times (l_{cu} - l_{cb})} dA \\ a_3 &= E_s \int_{A_s} \frac{N_1(\xi^*, \eta)}{l_s} (y - y_g) dA + E_c \int_{A_c} \frac{1+\eta}{l_{cb} + l_{cu} + \eta \times (l_{cu} - l_{cb})} (y - y_g) dA \\ a_4 &= E_s \int_{A_s} \frac{N_2(\xi^*, \eta)}{l_s} (y - y_g) dA + E_c \int_{A_c} \frac{1-\eta}{l_{cb} + l_{cu} + \eta \times (l_{cu} - l_{cb})} (y - y_g) dA \\ N_0 &= \int_{A_c} \sigma_{ch}(x, y) dA - \int_{A_s} \sigma_{sh}(x, y) dA \\ M_0 &= \int_{A_c} \sigma_{ch}(x, y)(y - y_g) dA - \int_{A_s} \sigma_{sh}(x, y)(y - y_g) dA \end{aligned}$$

式 (1-5) を式 (1-3)、(1-4) に代入することでそれぞれのひずみを求めることが出来る。これ以降の定式化は定式化は矩形の応力解放領域を仮定した CP ひびわれ幅法と同じ。

#### 4. JCMAC2 との比較

開発したプログラム (以下 CPk2) と JCMAC2 の解析結果の比較を行う。図-1.4 にはコンクリート応力の比較、図-1.5 にはひびわれ幅の比較を示す。解析モデルは表中に示す通りである。

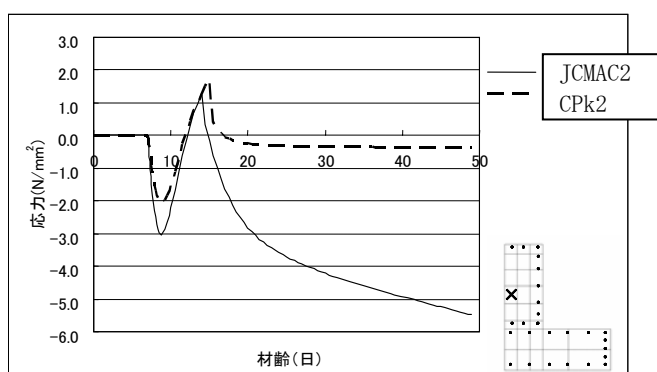


図-1.4 コンクリート応力の分布図

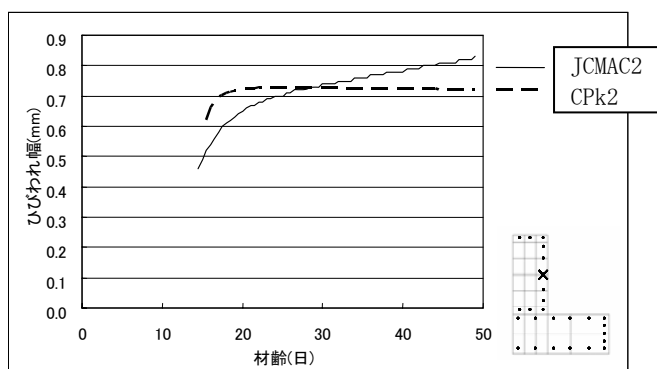


図-1.5 ひびわれ幅の分布図

#### 5. FEM との比較

CPk2 と FEM (Astea-MacsVer4 を使用) の解析結果の比較を行う。図-1.6 にはコンクリート応力の比較、図-1.7 にはひびわれ幅の比較を示す。解析モデルは表中に示す通りである。

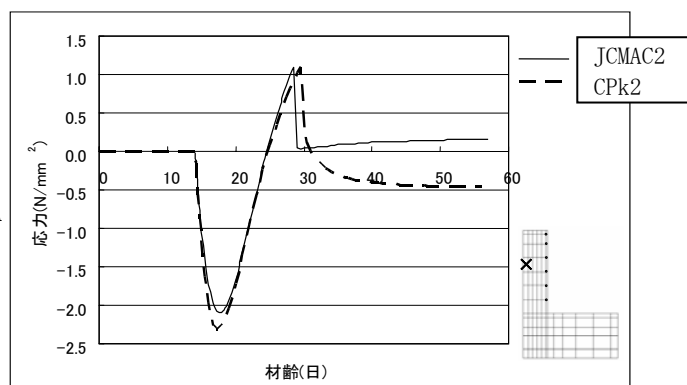


図-1.6 コンクリートの応力分布図

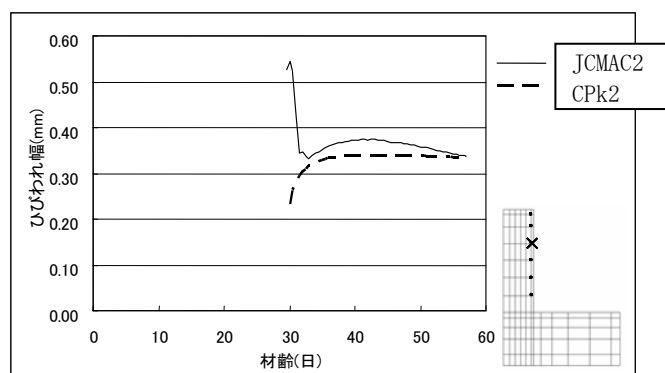


図-1.7 ひびわれ幅の分布図

#### 6. まとめ

本研究で開発したプログラム CPk2 は、次に示す通りである。まず、各節点で読み込んだ温度をもとに要素の中心温度を求めることで、FEM のメッシュデータをそのまま使用することが可能となり、開口部があるなど、任意形状の構造物に対応できるようになった。次に、ひびわれ指数とともに、全断面に対して引張強度を超えた面積割合を指定することにより、ひびわれ判定を自動にし、かつ合理的に行うことが可能となった。最後に、矩形の応力解放領域を拡張し、台形の応力解放領域を適用したアルゴリズムを導入することにより、打継面付近の応力およびひびわれ幅の精度を向上させることができた。CPk2 に関する妥当性に関しては、今後さらに検討を進めていく必要があると考えられるが、これらの成果より、現行の市販プログラムである JCMAC2 の改善が期待できるようになった。