

## 最適化手法を用いたマスコンクリートの温度ひび割れ制御に関する基礎的研究

山口大学大学院 学生会員○松浦向太郎 山口大学大学院 学生会員 田中知可・江本久雄

山口大学工学部 正会員 中村秀明・宮本文穂

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の建設では、大型化、高強度化、および高速施工化に伴い、セメントの水和熱による温度ひび割れの発生が問題となっている。そのため、耐久性や機能性の観点から温度ひび割れを制御する必要がある。温度ひび割れの検討では、ひび割れ指数<sup>1)</sup>が一般に用いられており、温度応力解析を実施することにより得られるひび割れ指数から温度ひび割れの検討が行われている。しかしながら、数多くの施工条件(案)に対して、温度応力解析を実施し、ひび割れ指数が最大となる条件を選び出すのは、組み合わせ数が膨大になることから、人手による作業では非常に大変な作業となる。一般にこのような問題は、複数の施工条件(案)の組み合わせの中から、最適な組み合わせを見つけることになるので、組み合わせ最適化問題として取り扱うことができる。そこで、本研究ではマスコンクリートの温度ひび割れ制御に遺伝的アルゴリズム（以下 GA）の適用を試みた。本研究では特に、解の探索をより合理的に行うため、GA の処理手順である初期個体の生成に工夫を施した。

## 2. GA の処理手順

本研究では、図1で示した処理手順に従い遺伝的操作を行った。ここで、本研究で用いた GA の処理の手順について概説する。

## ①遺伝子型の決定

対象となる問題に適応した遺伝子型の形を決定する。

## ②初期集団の発生

乱数を用いて初期集団をランダムに発生させる。本研究の GA ではここに工夫を施す。

## ③各個体の評価

適応度の計算を行う。本研究では、FEM 温度応力解析プログラムを評価指標として用いている。適応度は一般的に高いほど良い個体である。

## ④選択・淘汰

適応度の低いものを淘汰し、次世代に移行する操作を行う。この操作には主に次の2つがある。

- i) ルーレット選択方式：適応度の高い個体を、重複を許して優先的に選んでいく方式。
- ii) エリート保存戦略：適応度の最も高かった個体を次世代に無条件で移行させる方法。

## ⑤交叉

2つの個体の遺伝子を交換して次世代に移行させる。これは、生物界の生殖を模倣した操作である。

## ⑥突然変異

遺伝子の値を対立遺伝子に置き換える操作。

## ⑦終了判定条件

ここで終了条件を満たしているか判定を行う。本システムでは一定の世代数に達したときに終了としている。

## 3. ひび割れの評価方法

ひび割れ発生の評価方法としては、一般的に、ひび割れ指数が用いられている。ひび割れ指数  $I_{cr}$  は、コンクリートの持つ引張強度をコンクリートに発生する引張応力で除したもので、式(1)で与えられる。

$$I_{cr}(t) = f_t(t) / \sigma_t(t) \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_t(t)$  は材齢  $t$  日の部材内の温度応力の最大値、 $f_t(t)$  は材齢  $t$  日のコンクリートの持つ引張強度である。

式(1)により得られたひび割れ指数は、これまでの解析および施工時の観測事例の結果から、ひび割れ発生確率に対して、図2のように整理されている。

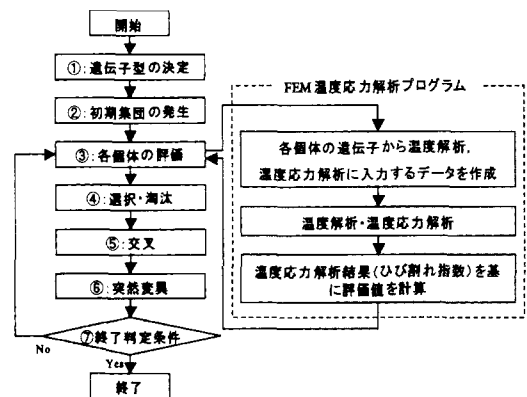


図1 GAの処理手順

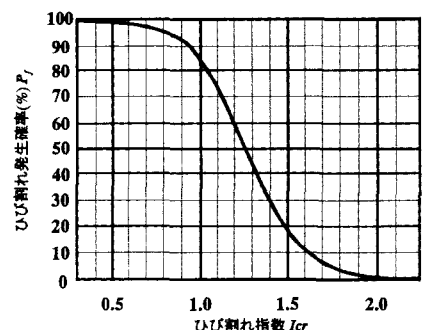


図2 ひび割れ指数とひび割れ発生確率の関係

#### 4. 温度ひび割れ制御支援システム構築

##### 4.1 施工条件のコーディング

温度ひび割れ制御にGAを適用するためには施工条件(案)を2進数の遺伝子型で表現する必要がある。表1に示すように施工条件(案)をコーディングした。遺伝子長は12ビットとなるので、解空間は $2^{12}=4096$ となる。

##### 4.2 目的関数と制約条件

本システムでは、ひび割れ指数の最大化を目的関数としている。目的関数を式(2)に示す。

$$\text{Object max } I_{\sigma} = f_i / \sigma_i \quad (2)$$

次に、制約条件を式(3)に示す。制約条件としては、一般的に後に行う養生ほど熱伝達率が大きくなることから、次のような制約を課す。

$$\text{Subject to } \eta_i \leq \eta_{i+1} \quad (3)$$

$\eta_i$ は*i*番目の養生方法による熱伝達率を意味する。

##### 4.3 GAによる検証

システムにGAを適用して検証を行った。個体数は10と設定した。通常のGAと改良したGAのパラメータは共通の値を用いた。図3に通常のGAで計算を行ったときの世代数と適応度の関係を示す。全ての組み合わせ( $2^{12}=4096$ )に対する結果から39世代目で得られた個体が最適解(ひび割れ指数が最大となる解)とわかった。ここで、GAの計算を100回行ったときの最適解を得られた世代数の推移を図4に示す。この図から、最適解が得られた世代数にむらがあることがわかる。これはGA処理において、乱数を用いてランダムに初期個体群を生成しているからである。この問題を解決するために、初期個体群に知識を与える改良GAを提案し、検証を行う。

##### 4.4 改良GAの検証

知識を与えた改良GAの検証を行い、最適解が得られた世代数の平均値、分散値を求めることにより、どれだけ安定して少ない世代数で最適解を得ることができるかの検証を行った。表2に用いる知識の一覧を示す。

最適解が得られた世代数の平均値と分散値の一覧を表3に示す。まずは、初期個体群に知識を1種類与えた場合の検証を行った。これにより、知識を20%与えたとき、最適解が得られた世代数の平均値が一番低いことがわかった。また、知識を30%与えたときには20%のときより多少平均値は高いが分散値は低く、最適解を得られる世代数が安定していることがわかる。次に、知識を2種類与えた場合の検証を行った。このときも、与える知識の割合の合計が20%のときに安定して少ない世代数で最適解を得ることができた。最後に、知識を3種類与えたときの検証を行った。知識をそれぞれ10%ずつ与えたとき、2種類の知識を10%ずつ与えたときに比べて平均は少し高くなっているが、分散は低い値になっており、最適解を得られる世代数が安定していることがわかる。

表2 施工案となる知識一覧

| 知識No. | 適応度  | セメントの種類      | 養生方法1 | 養生期間1 | 養生方法2 | 養生期間2 | 養生方法3 |
|-------|------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 知識1   | 0.85 | 高炉セメントB種     | 養生マット | 7日    | 散水    | 7日    | 露出    |
| 知識2   | 0.61 | 中層ポルトランドセメント | 養生マット | 7日    | 露出    | 期限なし  | なし    |
| 知識3   | 0.7  | 普通ポルトランドセメント | 散水    | 7日    | 露出    | 期限なし  | なし    |

表3 平均値と分散値一覧

| 知識1を与えた割合 | 知識2を与えた割合 | 知識3を与えた割合 | 平均    | 分散       |
|-----------|-----------|-----------|-------|----------|
|           |           |           | 15.42 | 451.1036 |
| 20%       |           |           | 13.37 | 250.4931 |
| 30%       |           |           | 17.43 | 295.6851 |
|           | 20%       |           | 13.64 | 342.3504 |
|           | 30%       |           | 14.47 | 308.8891 |
|           |           | 20%       | 14.70 | 375.6500 |
|           |           | 30%       | 14.32 | 254.4578 |
| 10%       | 10%       |           | 12.62 | 242.4956 |
| 10%       |           | 10%       | 13.88 | 319.8656 |
|           | 10%       | 10%       | 12.01 | 296.7699 |
| 10%       | 10%       | 10%       | 14.49 | 294.4499 |

#### 5. まとめ

初期個体群に知識を与えることで少ない世代数で安定して最適解を得ることができた。また、その知識について、以下のよう傾向がわかった。

- ①与える知識によって最適解を得られる世代の推移に違いがある。
- ②異なる知識を複数与えたとき、与えた知識によらず少ない世代数で安定して最適解を得ることができる。
- ③与える知識の初期個体群に対する割合は与える知識が単数、複数問わず20%か30%が良い。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編、土木学会、p.173-193、1996.3.

表1 最適化に用いるパラメータ一覧

| 要素名                                 | パラメータ要素      | コード | 必要箇所  | 合計bit数 |
|-------------------------------------|--------------|-----|-------|--------|
| セメントの種類                             | 普通ポルトランドセメント | 00  | 1     | 2bit   |
|                                     | 中層ポルトランドセメント | 01  |       |        |
|                                     | 早強ポルトランドセメント | 10  |       |        |
|                                     | 高炉セメントB種     | 11  |       |        |
| 養生方法による熱伝導率<br>(W/m <sup>2</sup> ℃) | 2            | 00  | 3(期間) | 6bit   |
|                                     | 5            | 01  |       |        |
|                                     | 8            | 10  |       |        |
|                                     | 14           | 11  |       |        |
|                                     | 3            | 00  |       |        |
| 養生を行う日数(日)                          | 7            | 01  | 2(期間) | 4bit   |
|                                     | 10           | 10  |       |        |
|                                     | 10           | 10  |       |        |
|                                     | 最後まで         | 11  |       |        |
|                                     | 合計ビット数       |     |       |        |

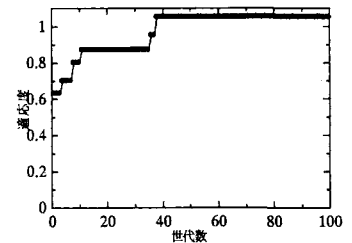


図3 世代数と適応度の関係

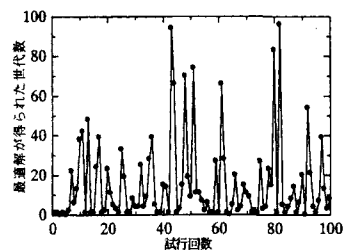


図4 試行回数と最適解が得られた世代数の推移