

## 東北のコンクリート構造物を対象とした初期ひび割れ発生確率図の提案

東北学院大学大学院 学生会員 ○増井 優哉

東北学院大学 工学部 正会員 石川 雅美

## 1. 目的

土木学会コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>(以下、示方書)では、マスコンクリートの温度ひび割れの危険度を判定するため、温度ひび割れ発生確率図が示されている。本研究では、東北地方で施工された46の構造物のひび割れ調査結果をもとに、3次元の温度応力解析を行い、ひび割れ指数とひび割れ発生確率の関係性を検討した。その結果、示方書のひび割れ発生確率図ではひび割れを防止したい場合のひび割れ指数が1.85以上(ひび割れ発生確率5%)となっているのに対して、本検討では1.4程度でもひび割れ発生確率が5%程度になることが示された。さらに、現行のひび割れ発生確率を表すワイブル関数に対して、パラメータをひとつ追加することによってひび割れ調査結果より算出したひび割れ発生確率のプロット値とワイブル曲線の相関係数を改善することができた。

## 2. ひび割れ調査を行った構造物

本研究では、表-1に示す東日本大震災からの復興事業において2014年1月～2017年11月に建設された46の橋脚および橋台に対して、3次元FEMモデルを作成して、日本コンクリート工学会JCMAC3を用いてひび割れ指数を計算した。ここでは46の構造物のそれぞれに対して、打設リフト毎にひび割れ発生確率の評価を行っている。したがって、評価データ数は172となった。すなわち、172のリフトにおけるひび割れ指数とひび割れ発生確率の関係を整理した。図-1に、解析モデルの代表的例を示す。

表-1 ひび割れ調査を行った構造物一覧

| 種別 | LIFT数 | 場所 | ひび割れ箇所        | 調査日        | 種別 | LIFT数 | 場所 | ひび割れ箇所     | 調査日        | 種別 | LIFT数 | 場所 | ひび割れ箇所  | 調査日        |
|----|-------|----|---------------|------------|----|-------|----|------------|------------|----|-------|----|---------|------------|
| 橋脚 | 5     | 岩手 | 1, 3, 4       | 2014/10/23 | 橋脚 | 3     | 岩手 | 1          | 2016/2/26  | 橋脚 | 4     | 岩手 | なし      | 2018/9/28  |
| 橋脚 | 3     | 岩手 | 3             | 2015/2/13  | 橋脚 | 3     | 岩手 | 1          | 2016/4/28  | 橋脚 | 4     | 岩手 | 1       | 2018/9/28  |
| 函渠 | 3     | 岩手 | 2             | 2015/3/10  | 橋台 | 4     | 岩手 | なし         | 2016/6/10  | 橋台 | 5     | 岩手 | 2, 3    | 2017/4/18  |
| 橋台 | 3     | 岩手 | 2             | 2014/10/16 | 橋台 | 3     | 岩手 | なし         | 2016/5/31  | 橋台 | 5     | 岩手 | 2, 3    | 2017/3/18  |
| 橋脚 | 3     | 青森 | 1             | 2014/3/31  | 橋台 | 4     | 岩手 | 1, 2, 3, 4 | 2016/1/26  | 橋脚 | 3     | 岩手 | 2       | 2017/3/31  |
| 橋台 | 5     | 岩手 | 1, 2, 3, 4, 5 | 2014/11/18 | 橋脚 | 5     | 岩手 | 2          | 2016/6/10  | 橋台 | 4     | 岩手 | 2       | 2017/11/18 |
| 橋脚 | 2     | 岩手 | 1             | 2015/5/31  | 橋脚 | 3     | 岩手 | 1          | 2016/7/26  | 橋台 | 2     | 岩手 | 2       | 2017/3/28  |
| 橋脚 | 4     | 福島 | 2, 3          | 2014/11/6  | 橋台 | 3     | 岩手 | 1, 2, 3    | 2016/6/27  | 橋台 | 3     | 岩手 | 2       | 2017/2/21  |
| 橋脚 | 5     | 福島 | 1, 3, 4, 5    | 2014/11/13 | 橋台 | 4     | 岩手 | 1, 2, 3, 4 | 2016/7/12  | 橋台 | 4     | 岩手 | 2       | 2017/10/29 |
| 橋脚 | 3     | 岩手 | 3             | 2015/5/14  | 橋台 | 2     | 岩手 | 2          | 2015/10/14 | 橋台 | 5     | 岩手 | なし      | 2016/3/31  |
| 橋脚 | 3     | 岩手 | 3             | 2015/4/8   | 橋脚 | 7     | 岩手 | 1          | 2016/2/13  | 橋台 | 4     | 岩手 | 1, 2    | 2015/9/1   |
| 橋脚 | 3     | 岩手 | 1, 2, 3       | 2015/8/17  | 橋台 | 4     | 岩手 | 2          | 2016/2/29  | 橋脚 | 4     | 岩手 | 1       | 2016/2/1   |
| 函渠 | 3     | 岩手 | 1             | 2015/10/13 | 橋台 | 3     | 宮城 | 1, 2       | 2015/10/7  | 橋脚 | 4     | 岩手 | 1       | 2016/4/8   |
| 橋台 | 5     | 岩手 | 1             | 2015/12/23 | 橋脚 | 5     | 宮城 | 5          | 2015/11/5  | 橋台 | 4     | 岩手 | 1, 2, 3 | 2017/6/3   |
| 橋脚 | 3     | 岩手 | 1             | 2016/7/22  | 橋台 | 3     | 宮城 | 1, 2       | 2015/11/4  |    |       |    |         |            |
| 橋脚 | 3     | 岩手 | 1             | 2016/1/6   | 橋脚 | 6     | 宮城 | 6          | 2016/6/14  |    |       |    |         |            |

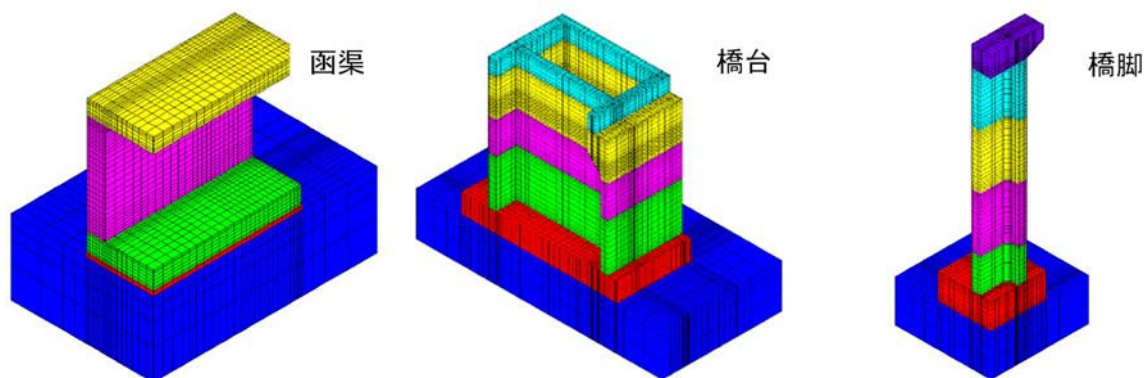


図-1 3次元FEM解析モデルの例

キーワード マスコンクリート, 温度応力, 温度ひび割れ, ひび割れ指数, ひび割れ発生確率

連絡先 〒980-8537 宮城県多賀城市中央一丁目13-1 TEL 022-368-1189

### 3. ひび割れ指数とひび割れ発生確率の導出手順

解析モデルよりひび割れ指数を算出した位置は 1) 実際にひび割れが生じたリフトでは表面のひび割れ位置、2)ひび割れが観測されていないリフトではそのリフトの表面のひび割れ指数が最小となる位置として、いずれの場合も評価した材齢はひび割れ調査日としている。なお、本解析では温度応力によるひび割れのみを対象としている。ひび割れ指数の範囲は 0.0~2.0 までとしてクラス幅を 0.1 とした。代表値は各クラスの中央値である。ひび割れ発生確率は各クラス別に「ひび割れありのリフト数/その指数クラス内に含まれるリフト数」とした。これらのひび割れ指数とひび割れ発生確率の点を図-2 の赤のマーカーで示す。

示方書では、ひび割れ指数をひび割れ発生確率の関係を以下の式(1)に示すワイブル関数で表している。

$$F(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x}{\alpha} \right)^m \right] \cdot \cdot (1)$$

ここで、 $x=Icr$ ：ひび割れ指数、 $F(x)=P(Icr)$ ：ひび割れ発生確率、 $m$ ：パラメータ ( $=-4.29$ )、 $\alpha$ ：パラメータ ( $=0.92$ )。式(1)で示される示方書の発生確率を図-2 の黒線で示す。本検討から得られているプロット点(赤)は、いずれも示方書の曲線より低いひび割れ発生確率となっている。そこで、これらのプロットの点を回帰するように、示方書のパラメータ  $m$  と  $\alpha$  の値を求める。

これらの点を式(1)で近似する場合は(1)式の両辺の 2 回対数を取ることで線形化することが出来る<sup>2)</sup>。

$$1 - F(x) = \exp \left[ - \left( \frac{x}{\alpha} \right)^m \right]$$

すなわち、右辺の 1 を左辺に移項して両辺を 2 回対数に取る

$$\ln \left[ \ln \left[ \frac{1}{1-F(x)} \right] \right] = m \ln x - m \ln \alpha \cdot \cdot (2)$$

ここで式(2)の左辺を  $Y$ 、 $m = A$ 、 $\ln x = x$ 、 $m \ln \alpha = B$  と置くことで  $Y=Ax-B$  となり、最小二乗法により  $\alpha$  と  $m$  の値を定めることができる。その結果  $m=-1.83$ 、 $\alpha=0.58$ 、相関係数 0.75 となり、ひび割れ発生確率曲線を図-2 中の青線で示す。

この青の曲線を示方書の曲線と比較すると、ひび割れ指数が 1.8 を超えるとひび割れ指数が示方書の曲線を上回る結果をなっている。示方書では、ひび

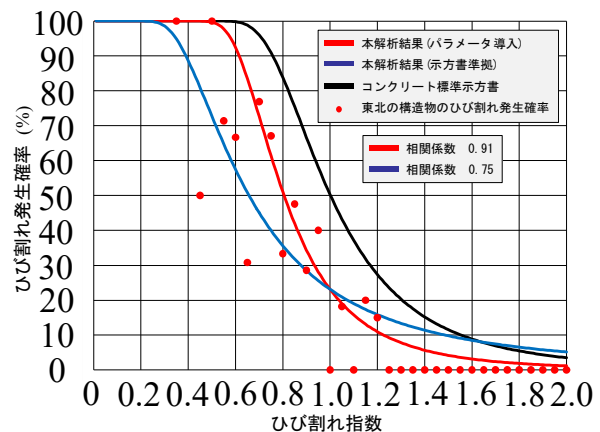


図-2 ひび割れ指数とひび割れ発生確率の関係

割れを防止したい場合、ひび割れ指数 1.85 以上、ひび割れ発生確率 5%と定めている。しかしながら、ひび割れ指数 1.85 を確保するひび割れ対策を実施することは、実際問題としてはかなり厳しい。そこで、ひび割れ指数が 1.8 を超える領域で、ひび割れ発生確率が大きくなる傾向を示す近似結果を検討した。

ここでは、式(1)の回帰精度を改善するためにパラメータ  $\beta$  を加えた式(4)を提案する。すなわち、

$$F(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x^\beta}{\alpha} \right)^m \right] \cdot \cdot (4)$$

この場合は(1)式と異なり関数形が複雑となるため両辺の対数をとることによって線形化することが出来ない。そこで、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $m$  の 3 つのパラメータを収束計算による最小二乗法により直接求めることにした。その結果、 $m=-2.31$ 、 $\alpha=0.56$ 、 $\beta=1.94$  を得た。得られたひび割れ発生曲線を図-2 の赤線で示す。この曲線は、図からも分かるようにプロット点をよく近似しており、相関係数 0.91 である。また、ひび割れ指数 1.4 で、ひび割れ発生確率 5%程度となった。

### 4. まとめ

本研究では、東北地方で施工した 46 の構造物、172 のリフトのひび割れ調査結果をもとに、ひび割れ指数とひび割れ発生確率を検討した。ここでは、この関係を表す示方書のワイブル関数にパラメータを追加することで回帰式の精度を向上させた。

### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編：本編]2017 年制，pp.322-327，2018
- 2) 金津 努・溝渕 利明・佐藤 良一・十河 茂幸：3 次元 FEM に基づく温度ひび割れ発生確率分布の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1549-1554，2009