

# RC 造縮小試験体に生じる曲げひび割れの定量化と その実大スケールへの換算評価に関する研究

Quantification for Flexural Cracks of Scaled RC Specimen and Conversion Procedure to Full Scale

沙拉依丁 沙吾提\*・松川 和人\*\*・崔 琥\*\*・中埜 良昭\*\*  
Shawuti SHALAYIDING, Kazuto MATSUKAWA, Ho CHOI and Yoshiaki NAKANO

## 1. はじめに

地震により被災した鉄筋コンクリート造 (RC) 建物の残存耐震性能や修復費用の評価には、部材に生じるひび割れの定量的評価が重要である。そのため、構造実験では可能な限り実大スケールに近い試験体を用いるのが望ましいが、実験施設の制約上、縮小試験体の使用を余儀なくされることが多い。従って、残存耐震性能や修復費用の算出のようにひび割れ損傷を基に議論がなされる場合には、縮小試験体から得られたひび割れ幅、長さ、本数などの損傷量について、何らかの方法で実大スケールの損傷に換算評価する必要がある。本研究では、縮小試験体に生じる曲げひび割れ量の実大スケールへの換算評価手法を提案する。また、新たに縮小率が異なる試験体を用いた検証実験を行い、提案手法の妥当性及適用性を検証する。

## 2. 既往の実験結果に基づいた換算評価手法の提案

### 2.1 曲げひび割れ本数とひび割れ幅の平均値の関係

図 1 に実大及び縮小試験体の同一部材角での幾何学的ひび割れモデル<sup>1)</sup>を示す。n を曲げひび割れ本数とすると、

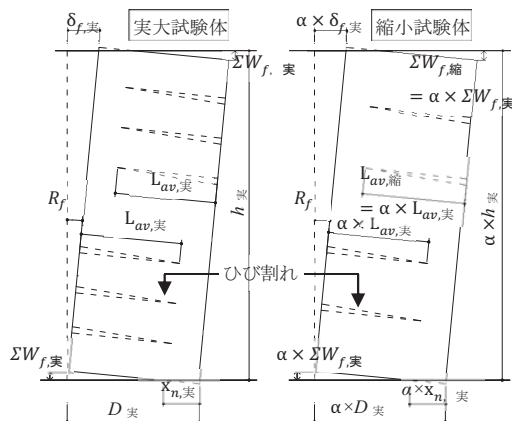


図 1 部材変形の幾何学的モデル

曲げひび割れ幅の合計値  $\Sigma W_f$  と曲げひび割れ幅の平均値  $W_{av}$  の間に式 (1) 及び式 (2) の関係が成り立つ。また、 $\alpha$  を縮小率、 $k_n$  を実大に対する縮小試験体のひび割れ本数の比と定義すれば、式 (3) ~ (5) の関係が得られる (縮小率はそれぞれ縮小と実大を表す (以下同様))。ここで式 (5) の関係を「幅-本数」関係と称する。

$$\Sigma W_f = n \times W_{av} \tag{1}$$

$$\frac{\Sigma W_{f, \text{縮}}}{\Sigma W_{f, \text{実}}} = \frac{n_{\text{縮}} \times W_{av, \text{縮}}}{n_{\text{実}} \times W_{av, \text{実}}} = k_n \frac{W_{av, \text{縮}}}{W_{av, \text{実}}} \tag{2}$$

$$\Sigma W_f = R_f \times (D - x_n) \tag{3}$$

$$\frac{\Sigma W_{f, \text{縮}}}{\Sigma W_{f, \text{実}}} = \frac{R_f \times \alpha (D - x_n)}{R_f \times (D - x_n)} = \alpha \tag{4}$$

$$\frac{W_{av, \text{縮}}}{W_{av, \text{実}}} = \alpha / k_n \tag{5}$$

### 2.2 曲げひび割れ本数と曲げひび割れ幅の最大値の関係

曲げひび割れ幅の最大値  $max W_f$  と合計値  $\Sigma W_f$  の関係は式 (6) 及び式 (7) で表せる。曲げひび割れ等価本数  $n_f$  は  $\Sigma W_f$  と  $max W_f$  の比<sup>1)</sup>であり、縮小試験体と実大試験体の  $n_f$  の比を  $k_{n_f}$  と定義する。 $k_{n_f}$  と  $max W_f$  の比は式 (8) のような関係になる。ここで、式 (8) と式 (5) の形式は同一であるため、 $max W_f$  の比と  $n_f$  の比  $k_{n_f}$  の関係も上記の「幅-本数」関係と同様に表すことができる。

$$\Sigma W_f = n_f \times max W_f \tag{6}$$

$$\frac{\Sigma W_{f, \text{縮}}}{\Sigma W_{f, \text{実}}} = \frac{n_{f, \text{縮}} \times max W_{f, \text{縮}}}{n_{f, \text{実}} \times max W_{f, \text{実}}} = k_{n_f} \frac{max W_{f, \text{縮}}}{max W_{f, \text{実}}} \tag{7}$$

$$\frac{max W_{f, \text{縮}}}{max W_{f, \text{実}}} = \frac{\Sigma W_{f, \text{縮}}}{\Sigma W_{f, \text{実}}} / k_{n_f} = \alpha / k_{n_f} \tag{8}$$

### 2.3 曲げひび割れ本数とひび割れ総長さの関係

図 1 に示す通り、曲げひび割れはそのすべてが断面中立軸位置 (図 1 中の  $x_n$ ) まで進展すると仮定すると、ひび割れ総長さ  $\Sigma L$  と平均長さ  $L_{av}$  の関係は式 (9) 及び式 (10) で表せる。また、実大試験体と縮小試験体の  $L_{av}$  の間に図 1

\*東京大学大学院 工学系研究科

\*\*東京大学生産技術研究所 基礎系部門

研 究 速 報

の関係が成り立つとすると、両試験体の  $L_m$  の比は式 (11) となる。なお、式 (11) を式 (10) に代入すると式 (12) が得られる。式 (12) を以下では「長さ-本数」関係と称する。

$$\Sigma L = n \times L_{av} \quad (9)$$

$$\frac{\Sigma L_{縮}}{\Sigma L_{実}} = \frac{n_{縮} \times L_{av, 縮}}{n_{実} \times L_{av, 実}} = k_n \frac{L_{av, 縮}}{L_{av, 実}} \quad (10)$$

$$\frac{L_{av, 縮}}{L_{av, 実}} = \alpha \quad (11)$$

$$\frac{\Sigma L_{縮}}{\Sigma L_{実}} = \alpha \times k_n \quad (12)$$

以上より、 $k_n$  と  $k_{nf}$  を推定できれば、これらに対応する「幅-本数」または、「長さ-本数」関係からひび割れ幅及び長さの比（縮小/実大）が分かるため、縮小試験体の実験を実施することにより得られたひび割れ量を実大スケールへ換算評価することが可能となる。

## 2.4 ひび割れ本数の比 $k_n$ の推定

$k_n$  を推定するには、実大試験体並びに縮小試験体のひび割れ本数  $n$  がわかればよい。 $n$  は平均ひび割れ間隔  $S_m$  を用いて式 (13) によって算定できる。

$$n = \frac{l_{cr}}{S_{av}} + 1 \quad (13)$$

ここで、 $l_{cr}$  はひび割れ発生領域で、後述 (4 章) の検討結果に基づき、本研究では断面せいの 2 倍 (2D) とする。 $S_m$  の推定には以前より様々な推定式が提案されている。著者らが文献<sup>2)</sup>において、プレストレストコンクリート (Ⅲ種 PC) 構造設計・施工指針・同解説による提案式<sup>3)</sup>、CEB-FIP 1978 式<sup>4)</sup>、EuroCode2 式<sup>5)</sup>、森田式<sup>6)</sup>の適合性を検討したところ、実験結果と最もよく対応したのが式 (14) に示す CEB-FIP 1978 式であったため、この式を用いることとする。同式で、 $c$  はかぶり厚さ、 $s$  は鉄筋間隔、 $\phi$  は鉄筋径、 $\rho_e$  は有効引張鉄筋比である。ただし、本式は変形が進んでも新たなひび割れが生じないひび割れ本数の定常状態における平均ひび割れ間隔式であるため、降伏以前の小変形領域には適合性が低い点に留意されたい。

$$S_{av} = 2 \left( c + \frac{s}{10} \right) + k_1 k_2 \frac{\phi}{\rho_e} \quad (14)$$

## 2.5 曲げひび割れ等価本数 $n_f$ の比 $k_{nf}$ の推定

曲げひび割れ等価本数  $n_f$  は、ひび割れ発生領域に生じるひび割れ本数の影響を受けると考えられる。また、加藤<sup>7)</sup>らは  $n_f$  をひび割れ本数の関数として評価している。従って、ここでは、 $n_f$  の比である  $k_{nf}$  を本数の比  $k_n$  から求めることとし、式 (15) で表す。定数  $\beta$  は後述の実験結果を用いて検討する。

$$k_{nf} = \beta k_n \quad (15)$$

## 3. 実 験 概 要

上述の提案評価手法の妥当性及適用性を検証することを目的に、縮小試験体並びに実大試験体を設計し、静的加力実験を行った。

### 3.1 試験体概要

まず、RC 造の中低層建物を想定した梁試験体を設定し、その実大試験体を F-1/1 とした。次に、幾何学的に相似率を維持し、断面寸法、鉄筋径、被り厚さ、鉄筋間隔を忠実に 1/2 及び 1/3 に縮小した試験体を FG-1/2、1/3 (幾何学的縮小試験体) とした。また、断面寸法のみ幾何学的相似率を維持し、せん断余裕度などの力学的特性を実大試験体に適合させることを重視した 1/3 縮小試験体を F-1/3 (一般縮小試験体) とした。各試験体の諸元を表 1 に示す。

### 3.2 載荷および計測計画

載荷装置図を図 2 に、F-1/1 試験体を例に示す。本実験では、ピーク部材角 0.1, 0.2, 0.4, 0.67, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0 (%) を目標に一方向載荷を行い、各ピーク部材角でひび割れ計測を行った後除荷した。除荷時のひび割れ計測のうち、次のピーク部材角を目標に再び載荷を行った。部材角 4.0% 以降は除荷せずに、部材角 14% (F-1/3 のみ 18%) まで単調載荷を行い、加力を修了した。

## 4. 曲げひび割れ量の推移及びその検討対象範囲の決定

### 4.1 各ひび割れ量の定義

図 3 に各試験体の部材角 2% 時のひび割れ図を示す。また、検討に用いるひび割れ量は以下の通りである。すなわち、ひび割れ幅  $W_f$  は断面縁の幅で代表し、ひび割れ総長さ  $\Sigma L$  は加力方向平行面と直交面それぞれにおける全ひび割れの長さとする。なお、本実験では曲げひび割れの発生に起因しない単独のせん断ひび割れはない。ひび割れ計測は目視で行い、ひび割れ幅の計測はクラックスケールを用いる。

### 4.2 ひび割れ本数 $n$ 及び検討対象範囲

図 4 に各試験体の曲げひび割れ本数  $n$  の推移を示す。なお、2.4 節で述べたようにひび割れ発生領域  $l_{cr}$  を部材下端から 2D (D: 部材せい) とし、その範囲内に生じる曲げひび割れを検討対象としたが、図 3 に示す各試験体ひび割れ図より、ほとんどのひび割れが部材下端から 2D の範囲内に生じていることが確認できる。ひび割れ本数  $n$  はいずれの試験体でもそれぞれの降伏部材角までは急増し、その後、部材角 3% 以降に F-1/1 試験体と FG-1/2 試験体のひび割れ本数  $n$  が多少増加した以外はほぼ一定値となっている。そこで、全試験体のひび割れ本数が概ね一定の値となる降伏部材角 0.67% 以降を式 (14) の適用範囲と考

表 1 試験体諸元

試験体名	b × D (mm)	h (m)	c (mm)	コンクリート Fe24 (N/mm <sup>2</sup> )	主筋 P <sub>c</sub> (%)	σ <sub>cy</sub> (SD345) (N/mm <sup>2</sup> )	補強筋 P <sub>s</sub> (%)	σ <sub>sy</sub> (SD295) (N/mm <sup>2</sup> )	*せん断余裕度
F-1/1	360 × 600	1.8	50.5	28.8	8-D19 0.53	396	D13@180 0.39	367	2.69
FG-1/2	180 × 300	0.9	25	28.8	8-D10 0.53	374	D6@90 0.39	356	2.92
FG-1/3	120 × 200	0.6	17	28.1	8-D6 0.53	350	D4@60 0.39	369	3.42
F-1/3			25	27.1	4-D10 0.59				374

\* 荒川 (mean) 式による

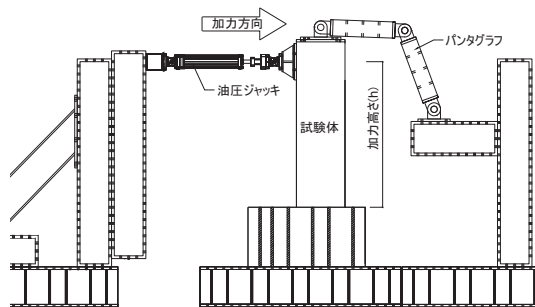


図 2 荷重装置図

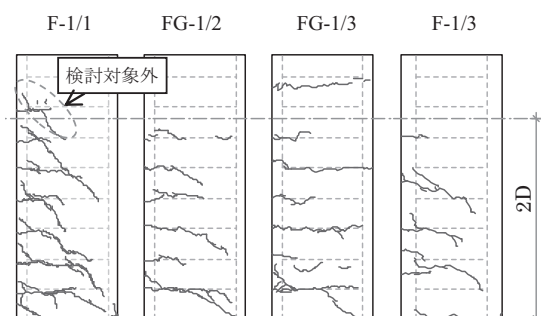


図 3 部材角 2% 時のひびわれ図

え、以下ではこの範囲でのひび割れを対象に議論する。また、RC 部材に生じるひび割れ幅については、クラックスケールによる目視での計測では誤差が生じ易いこともあり、その誤差の大小を確認するために以下の検討を行った。すなわち、ひび割れ幾何学的モデルによる式 (3) を用いて、曲げひび割れ幅合計値から曲げひび割れによる水平変形  $\delta_f$  を算定し、これと実験による全水平変形  $\delta$  にとの比 (曲げ変形成分) を図 5 に示す。同図より、変形が小さい部材角では弾性変形が支配的となるため、曲げひび割れから推定した曲げ変形割合が小さいが、変形が大きくなるにつれて、 $\delta_f$  は  $\delta$  によく近似した。また、一部の試験体・部材角に限って  $\delta_f$  が  $\delta$  離れるものもあった。そこで、ひび割れ幅については、 $\delta_f$  が  $\delta$  を基準に  $\pm 20\%$  の範囲内であり、かつ上述のひび割れ本数がほぼ一定となる降伏部材角 0.67% 以

降の試験体・部材角での計測値 (図 5 の斜線の部分) を用いて、以下の議論を行うことにした。

## 5. 提案手法によるひび割れ量の評価

### 5.1 実験結果による $k_n$ 及び $k_{nf}$ の検討

曲げひび割れ本数の比  $k_n$  及び  $n_f$  の比  $k_{nf}$  の推定は、第 2 章で提案した換算評価手法の実用化にあたって重要なカギとなる。ここで、 $k_n$  の推定精度は平均ひび割れ間隔  $S_{av}$  に左右されるため、以下では、上述した既往の提案式による  $S_{av}$  の推定精度を検証する。図 6 に部材角 0.67% 時の  $S_{av}$  実験値と 2.4 節述べた各式による  $S_{av}$  推定値の比較を示す。同図より、CEB-FIP 1978 式の推定結果は、一般縮小試験体である F-1/3 では約 20% の誤差を示したものの、実験値を精度よく評価できた。また、CEB-FIP 1978 式で  $S_{av}$  を代表させ、式 (13) からひび割れ本数  $n$  を推定すると、図 4 に示したように、ひび割れ本数を概ね評価できた。

続いて、図 7 にピーク時における式 (15) の  $\beta$  の値を示す。同図より、 $\beta$  は部材角 1.5% 以降では 1.0 付近で分布していることがわかる。また、部材角 0.67% と 1% においては、ばらつきがより大きくなるが、主に上記のひび割れによる水平変形  $\delta_f$  が  $\delta$  の 20% 範囲外の試験体・部材角 (図 7 の  $\circ$  を付していないプロット) にばらつきが生じている。以上より、4.2 節で述べた検討対象範囲において  $\beta$  の値を 1 とした。

### 5.2 曲げひび割れ幅及び長さの評価

図 8 (a) に、実大試験体 F-1/1 に対する各縮小試験体の曲げひび割れ本数の比  $k_n$  とひび割れ幅の平均値  $W_{av}$ 、及び最大値  $max W_f$  の比の関係、図 8 (b) に  $k_n$  と総長さ  $\Sigma L$  の比の関係をそれぞれ示す。ただし、4.2 節で述べた検討対象外の実験結果は白抜きのプロット ( $\triangle$ ,  $\diamond$ ) で示す。その結果、 $W_{av}$ 、及び  $max W_f$  については、検討対象データは概ね「幅一本数」関係の  $\pm 20\%$  範囲内にプロットされ、「幅一本数」関係の妥当性を裏付けるものとなった。 $\Sigma L$  については「長さ一本数」関係の  $\pm 30\%$  範囲内にプロットされたものの、全体的に「長さ一本数」関係を下回る傾向があった。これは図 3 に示した通り、せん断余裕度が最も低い実大試験体 (F-1/1) の加力方向平行面に生じる曲げせん断ひび割れの斜め方向への伸展が他の試験体より顕著であったことが原因と考えられる。

同図に示した  $max W_f$ ,  $W_{av}$ , ( $\circ$ ) または  $\Sigma L$  ( $\square$ ) の比の推定値は、式 (13) から  $k_n$  を算定し「幅一本数」または「長さ一本数」関係上にプロットしたものであるが、いずれも  $k_n$  の推定値と実験値に近いほど実験結果と近似した。従って、本換算評価手法の推定精度を向上させるには  $k_n$  の推定精度を向上させる必要がある。

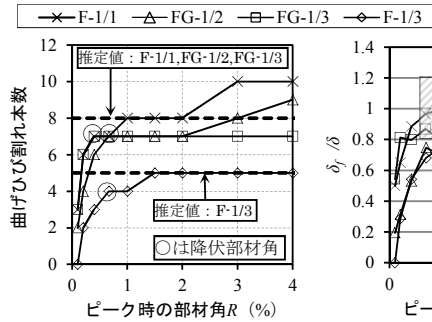


図 4 曲げひび割れの本数

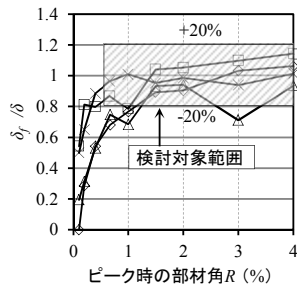


図 5 曲げ変形割合

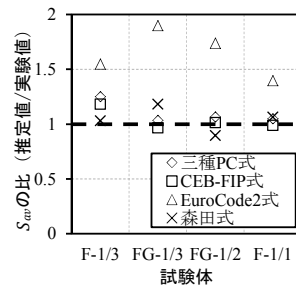


図 6  $S_{av}$  推定式の適用

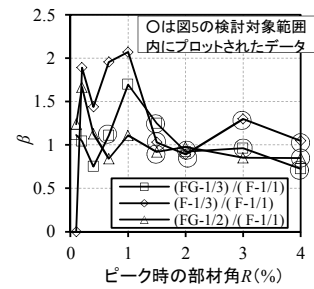


図 7  $\beta$  の推定

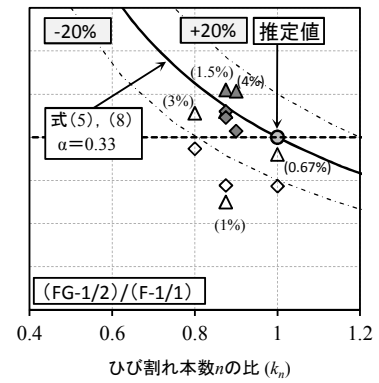
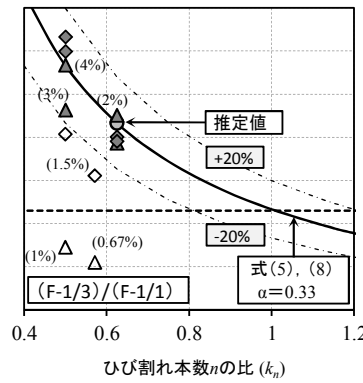
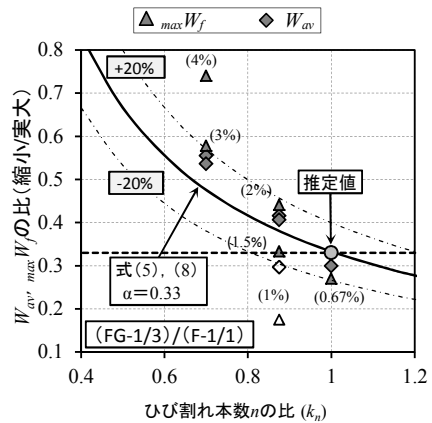


図 8 (a) 提案手法によるひび割れ幅の評価

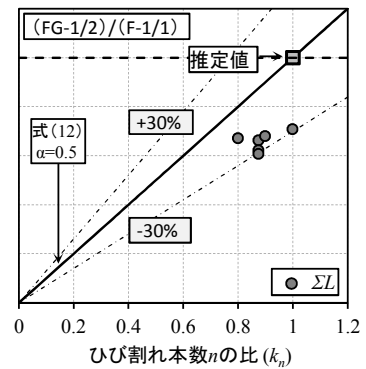
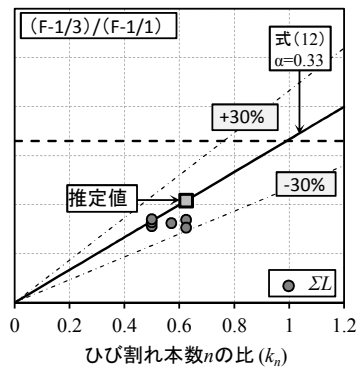
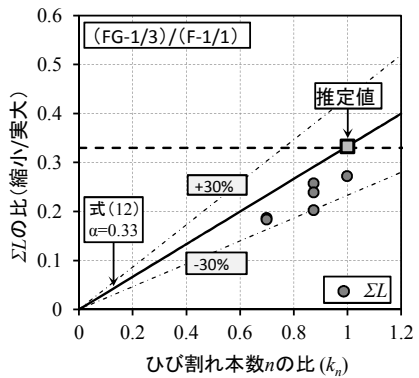


図 8 (b) 提案手法によるひび割れ総長さの評価

(2014 年 9 月 10 日 受理)

## 6. ま と め

RC 造縮小試験体に生じる曲げひび割れ量の実大スケールへの換算評価手法を提案し、検証実験により、提案手法の妥当性や適用性を検証した。その結果を以下にまとめる。

- (1)  $max W_f$ ,  $W_{av}$ ,  $\Sigma L$  の比は「幅一本数」関係、または「長さ一本数」関係によって概ね評価できた。
- (2)  $max W_f$ ,  $W_{av}$  及び  $\Sigma L$  に対する換算評価手法の精度を向上させるために、ひび割れ本数  $n$  の推定精度を向上させる必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針 (案)・同解説 2004
- 2) 沙拉依丁ほか：RC 造縮小試験体に生じた曲げひび割れの実大スケールへの読み替え方法に関する研究 その 2, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.539-540, 2014.9
- 3) 日本建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート (Ⅲ種 PC) 構造設計・施工指針・同解説, 1992.10
- 4) CEB-FIP : Model Code for Concrete Structures, 1978

- 5) A.W.Beeby and R.S.Narayanan: Designers' Handbook to Eurocode 2, 1995
- 6) 森田司郎: ひび割れの制御設計 - RC 構造の場合 - コンクリートジャーナル, Vol.11, No.9, Sep.1973
- 7) 加藤大介ほか: RC 造柱部材のひび割れ幅の評価法 その 1 ~ その 2, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.137-140, 2003.3