

**RC 部材の地震応答変位履歴とひび割れ幅-ひび割れ長さの関係
RELATION BETWEEN SEISMIC RESPONSE DISPLACEMENT
TIME-HISTORY AND CRACK LENGTH DISTRIBUTION TO CRACK
WIDTH OF R/C MEMEBRS**

高橋典之¹⁾、中埜良昭²⁾

Noriyuki TAKAHASHI¹, Yoshiaki NAKANO²

1) 東京大学生産技術研究所、助教 博 (工)

¹ Research Associate, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Ph.D.

e-mail : ntaka@iis.u-tokyo.ac.jp

2) 東京大学生産技術研究所、教授 工博

² Professor, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Ph.D.

e-mail : iisnak@iis.u-tokyo.ac.jp

ABSTRACT: A geometrical damage estimation model, which was proposed by the author, is revised to accurately quantify crack widths and corresponding lengths in reinforced concrete (R/C) members. The empirical model for the ratio of the maximum crack width to the average crack width is employed. It is revealed that the new model successfully approximates the measured crack widths and corresponding lengths.

キーワード: 鉄筋コンクリート, ひび割れ幅, ひび割れ長さ

1. はじめに

筆者らは、地震応答変位履歴を想定した部材変形角に応じて、ひび割れ幅とひび割れ長さを求める簡単な方法として、

[Step 1] 部材角 R に対して幾何学的なひび割れ-変形モデルを用いてひび割れ幅の合計値 Σw を求め、

[Step 2] 平均ひび割れ幅 w_{av} と最大ひび割れ幅 w_{max} の関係を一意に定めてひび割れ幅分布形状を特定し、

[Step 3] 各ひび割れ幅階級のひび割れ長さをヒストグラムとして求める。

手順を提案しているが、ひび割れ幅-ひび割れ長さ関係の推定結果と実験結果を比較したところ、大変形時では小さいひび割れ幅のひび割れ長さを過小評価する傾向がこれまでの検討で分かってきた。

そこで本稿では、[Step 2]で一意に定めた平均ひび割れ幅 w_{av} と最大ひび割れ幅 w_{max} の関係に経験最大変形角 IDR_0 に応じた回帰式モデルを導入し、大変形時におけるひび割れ幅-ひび割れ長さ関係の推定精度について検討を行った。

2. ひび割れ量推定手法の概要

筆者らが検討しているひび割れ量推定手法¹⁾は、既往の幾何学的なひび割れ-変形モデルにひび割れ幅分布モデル(横軸にひび割れ幅をとり、縦軸にひび割れ総長さに対する該当ひび割れ幅となるひび割れの長さの比率をとった確率密度関数)をあてはめ、幾何学的なひび割れ-変形モデルに表されているひび割れ幅の合計値を分解し、ひび割れ幅の階級ごとにひび割れ長さを求める方法である。ここで、簡単に本推定手法の概要を説明する。

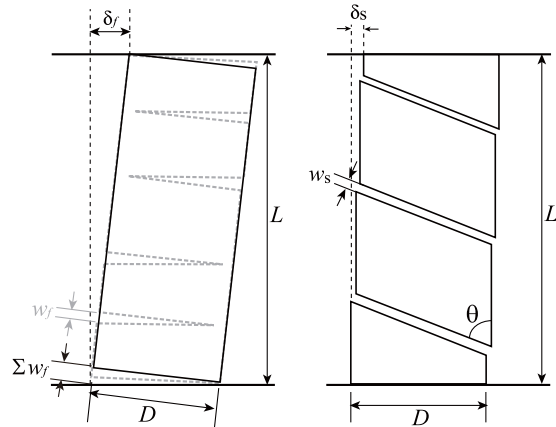
(1) 幾何学的モデルからひび割れ幅の合計値を推定

日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価型設計指針(案)・同解説」²⁾では、部材の曲げひび割れ幅およびせん断ひび割れ幅と部材変形との関係を図 1 に示す幾何学的なモデルを用い

て説明している。しかし、杉らの実験³⁾によって、この幾何学的モデルはせん断ひび割れ幅とせん断変形の関係においてせん断変形を過小評価することが指摘されている。本推定手法では、文献 3)に従ってせん断ひび割れ幅とせん断変形の間を補正し、曲げ変形成分 R_f とせん断変形成分 R_s の合計で表される部材角 R が、

$$R = R_f + R_s = \frac{\sum w_f}{D - x_n} + \frac{2\sum w_s \cdot \cos\theta}{L} \quad (1)$$

で表されると仮定した。ここに、 $\sum w_f$ ：曲げひび割れ幅の材軸方向への合計、 $\sum w_s$ ：せん断ひび割れ幅の合計、 D ：部材せい、 x_n ：圧縮縁から中立軸までの距離、 θ ：せん断ひび割れと材軸のなす角度、 L ：部材内法スパンである。



(a) 曲げひび割れ変形モデル (b) せん断ひび割れ変形モデル

図 1 幾何学的なひび割れ変形モデル²⁾

(2) ひび割れ幅分布モデルの導入

文献 2)では、最大残留ひび割れ幅 w_{max} に対する残留ひび割れ幅合計 $\sum w$ の比を n (曲げの場合 n_f , せん断の場合 n_s) とすると、 n_f は概ね 2 程度、 n_s は概ね 3~4 程度になると述べている。これは、最大ひび割れ幅を示したひび割れ以外のひび割れが、残りのひび割れ幅 (曲げひび割れでは約 $\sum w_f/2$, せん断ひび割れでは約 $2\sum w_s/3 \sim 3\sum w_s/4$) を分担していると考えられることができる。本推定手法では、ひび割れ幅の開き具合を当該ひび割れの長さに対応させた「ひび割れ分布モデル」を定める。

滝本らの実験結果⁴⁾によれば、ひび割れ幅分布モデルはほぼ対数正規分布に従う。本推定手法では、文献 4)を参考にひび割れ幅分布モデルの標準偏差 σ を 1.1 と仮定し、部材角 R に対して平均値 μ が推定できる (すなわち平均ひび割れ幅 w_{av} が期待値

$$w_{av} = E(X) = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (2)$$

として推定できる) ものとして、ひび割れ幅分布を特定した。

(3) ひび割れ幅の階級分け

上限のない確率密度関数として表されるひび割れ幅分布を n_{class} 個のひび割れ幅階級で離散化することで、 w_{max} を上限とするひび割れ幅階級ごとにひび割れ長さを推定できるようになる。そこでまず、平均ひび割れ間隔 S_{av} ⁵⁾を用いて、曲げ変形に対する平均ひび割れ総長さ l_{av} を幾何学的に

$$l_{av} = \frac{\zeta \cdot L \cdot (D - x_n)}{S_{av}} \quad (3)$$

と定める (図 2)。ここに、 L ：部材長、 D ：部材せい、 ζ ：ひび割れ程度を表す無次元数⁵⁾である。同様にせん断変形に対する平均ひび割れ総長さ l_{av} を幾何学的に

$$l_{av} = \frac{D}{\sin\theta} \left(\frac{D \cos\theta + L \sin\theta}{S_{av}} - 2q \right) + \frac{q \cdot (q+1) \cdot S_{av}}{\sin\theta \cos\theta} \quad (4)$$

と定める (図 3)。ここに、 L : 部材長、 D : 部材せい、 θ : せん断ひび割れと材軸のなす角度、 $q: D\cos\theta$ を S_{av} で除したときの商 ($D\cos\theta < S_{av}$ のときは $q=0$) である。

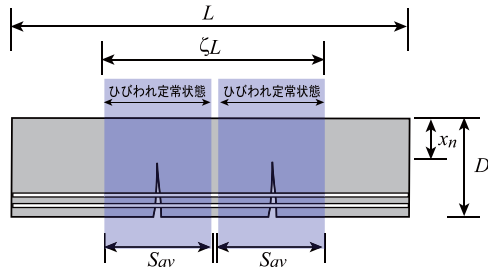


図 2 曲げ変形に対する平均ひび割れ総長さ

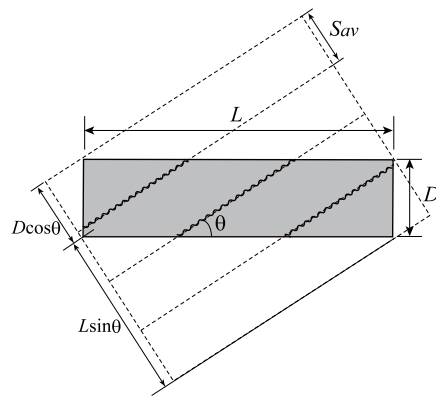


図 3 せん断変形に対する平均ひび割れ総長さ

ここで、最大ひび割れ幅となるひび割れの長さを $l_{1,max}$ 、ひび割れ幅分布確率密度関数を $f(X)$ 、小数点以下を四捨五入する関数を $round\{x\}$ とおけば、ひび割れ幅分布から推定されるひび割れ総長さ l_{av} は、

$$l_{av} = \sum_{i=1}^{n_{class}} \left[round \left\{ \frac{f \left(\frac{2i-1}{2n_{class}-1} \cdot w_{max} \right)}{f(w_{max})} \right\} \right] \cdot l_{1,max} \quad (5)$$

と表される。このとき、最大ひび割れ幅となるひび割れの長さ $l_{1,max}$ は曲げ変形の場合、

$$l_{1,max} = D - x_n \quad (6)$$

せん断変形の場合、

$$l_{1,max} = \frac{D}{\sin \theta} \quad (7)$$

で表されるものとする。

(4) ひび割れ幅階級ごとのひび割れ長さの推定

ひび割れ幅分布関数 (確率密度関数) の定積分により、ひび割れ幅階級ごとのひび割れ長さの和 l_{w_i} を、最大ひび割れ幅となるひび割れの長さ $l_{1,max}$ に対する比を用いて、

$$l_{w_i} = \frac{\int_{w_i-\alpha}^{w_i+\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot x} \exp \left(\frac{-(\ln x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right) dx}{\int_{w_{max}-\alpha}^{w_{max}+\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot x} \exp \left(\frac{-(\ln x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right) dx} \cdot l_{1,max} \quad (8)$$

と求めることができる。本推定手法では、平均ひび割れ総長さ l_{av} に対して、

$$l_{av} \geq \sum_{i=1}^{n_{class}} l_{w_i} \quad (9)$$

を満たすように、ひび割れ幅の小さい階級のひび割れ長さを減じて階級ごとのひび割れ長さを求めた。

3. 既往の実験結果^{6),7)}に基づく推定手法の修正

筆者の提案している手法は開発端緒にあるため、幾何学的な関係だけでは求めることのできない、最大残留ひび割れ幅 w_{max} に対する残留ひび割れ幅合計 Σw の比、最大ひび割れ幅 w_{max} と平均ひび割れ幅 w_{av} の比、ひび割れ程度を表す無次元数 ζ 、ひび割れ幅分布モデルの標準偏差 σ 、などの本来変動するパラメータを一意に定めて解析を試行してきた。本稿ではこれらのパラメータのうち、特に最大ひび割れ幅 w_{max} と平均ひび割れ幅 w_{av} の比に着目して、既往の実験結果^{6),7)}に基づき推定手法における当該パラメータを簡単な回帰式でモデル化し、推定結果の改善を試みた。

図4は、文献6)および文献7)の実験結果から求めた平均ひび割れ幅 w_{av} と最大ひび割れ幅 w_{max} の比を経験層間変形角 IDR_e ごとに示した図である。図4の凡例に記した「実験1」は文献6)の実験結果を、「実験2」は文献7)の実験結果を表している。図4より、試験体および計測部位によるばらつきはあるものの、経験層間変形角 IDR_e が大きくなるにつれ、平均ひび割れ幅 w_{av} を最大ひび割れ幅 w_{max} で除した値が小さくなる傾向が読み取れる。

既往の推定手法では、CEB-FIP Code 1978⁵⁾に基づき、平均ひび割れ幅 w_{av} と最大ひび割れ幅 w_{max} との関係を示す、曲げひび割れについては概ね、

$$w_{av}/w_{max} = 0.588 \quad (10)$$

せん断ひび割れについては概ね、

$$w_{av}/w_{max} = (0.588/\kappa_w) \quad (11)$$

で表されるものと仮定した。ここに、 κ_w ：ひび割れ間隔にあるせん断補強筋の角度による影響を考慮した係数(せん断補強筋が材軸となす角度が 90° のとき $\kappa_w=1.2$ 、 $45\sim 60^\circ$ のとき $\kappa_w=0.8$)である。しかし、(10)式および(11)式は長期荷重に対して求められた関係式であり、図4においても(10)式および(11)式の関係が成立する範囲が経験層間変形角でおよそ $0.005[\text{rad}]$ 未満となっていることから、(10)式および(11)式を大変形時に適用することはできないと考えられる。

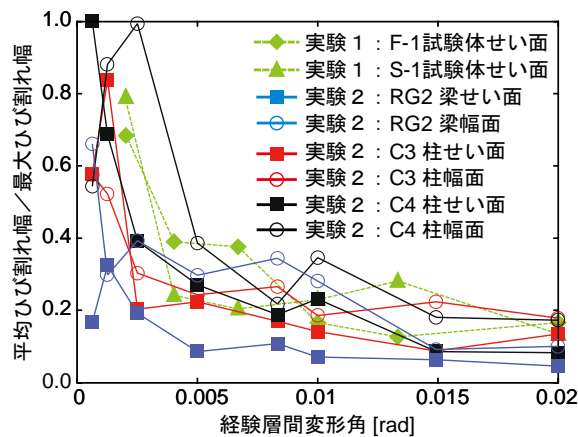


図4 平均ひび割れ幅と最大ひび割れ幅の比の推移

そこで、平均ひび割れ幅 w_{av} を最大ひび割れ幅 w_{max} で除した値と経験層間変形角 IDR_e との関係性を極めて簡単な式でモデル化する。図4の実験値から累乗近似曲線を求めると、

$$w_{av}/w_{max} = 0.02 \cdot IDR_e^{-0.48} \quad (12)$$

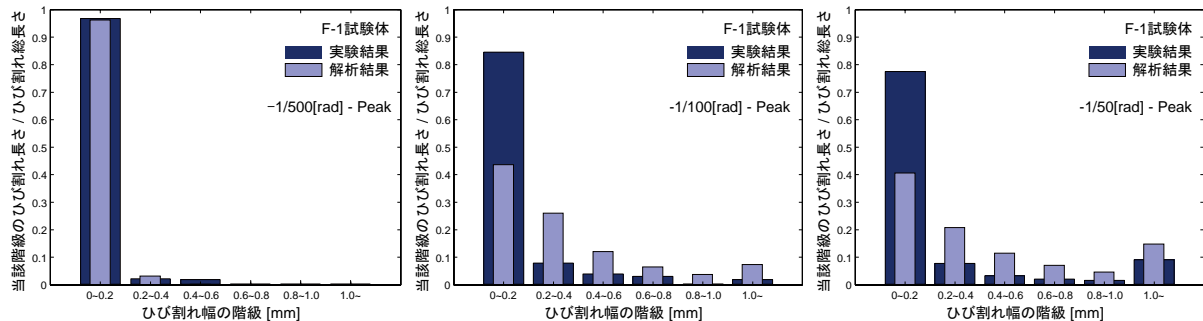
を得る。(12)式は極めて限られた試験体の実験結果を元に得た回帰式であり、一般性をもったモデルではないことに注意が必要である。この点に留意した上で、次章では文献6)の実験結果を対象に、CEB-FIPの(10)式および(11)式を用いたときのひび割れ幅—ひび割れ長さ関係の推定結果と、(12)式を用いたときのひび割れ幅—ひび割れ長さ関係の推定結果とが、実験結果をどれだけ模擬できているかを比較する。

4. 平均ひび割れ幅と最大ひび割れ幅の比に関する提案モデルを用いた推定例

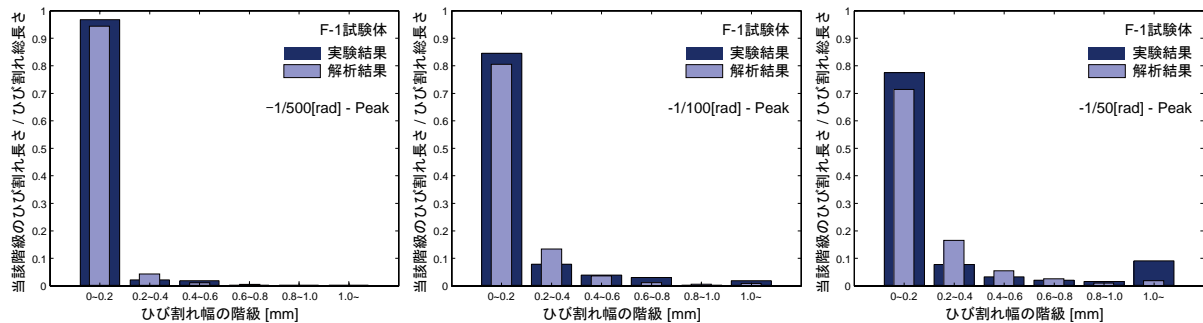
図5に文献6)のF-1試験体におけるひび割れ幅—ひび割れ長さ関係の推定結果および実験結果を、図6に文献6)のF-1試験体におけるひび割れ幅—ひび割れ長さ関係の推定結果および実験結果を示す。図5(a)および図6(a)は実験結果のうえに(10)式および(11)式を用いた推定結果を重ねて示し、図5(b)および図6(b)は実験結果のうえに(12)式を用いた推定結果を重ねて示した。

文献6)の実験結果も含んだ回帰式により(12)式を得ていることから、図5(a)および図6(a)よりも図5(b)および図6(b)の推定結果が実験結果をより精度良く模擬することは当然予想されることではあるが、小

変形時 (1/500[rad.]) では(10)式および(11)式を用いた推定結果と(12)式を用いた推定結果の違いは見られないのに対し、変形が大きくなる (1/100[rad.]および1/50[rad.]) と、(10)式および(11)式を用いた推定結果と(12)式を用いた推定結果が大きく異なり、(12)式を用いた推定結果のほうが実験結果をうまく模擬できていることが分かる。

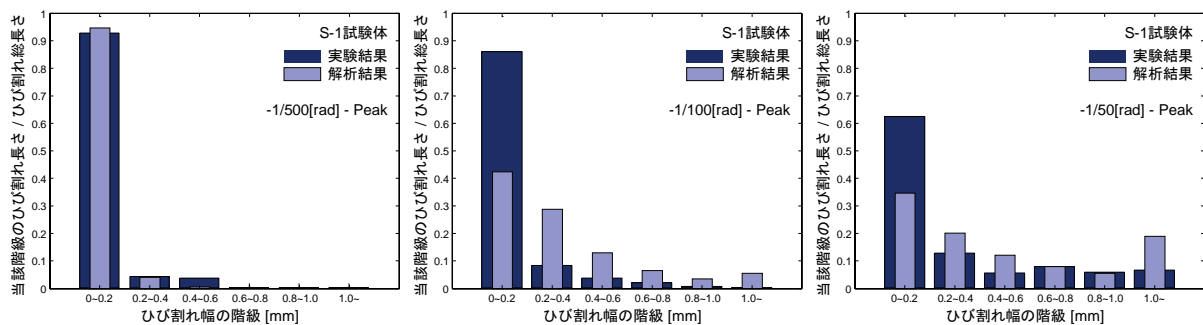


(a) 平均ひび割れ幅と最大ひび割れ幅の比に関する提案モデル導入前 ((10)式および(11)式)

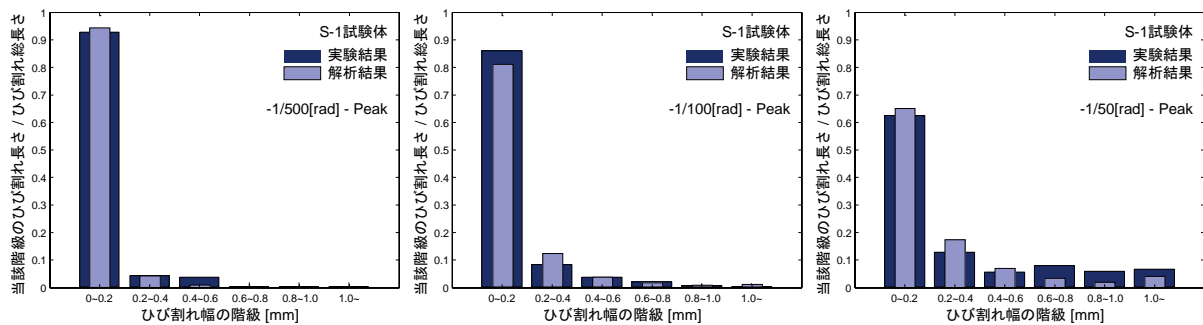


(b) 平均ひび割れ幅と最大ひび割れ幅の比に関する提案モデル導入後 ((12)式)

図5 ひび割れ幅—ひび割れ長さ関係の推定結果 (F-1試験体⁶)



(a) 平均ひび割れ幅と最大ひび割れ幅の比に関する提案モデル導入前 ((10)式および(11)式)



(b) 平均ひび割れ幅と最大ひび割れ幅の比に関する提案モデル導入後 ((12)式)

図6 ひび割れ幅—ひび割れ長さ関係の推定結果 (S-1試験体⁶)

5. まとめ

平均ひび割れ幅を最大ひび割れ幅で除した値と経験最大変形角との関係を，既往の実験結果から回帰式でモデル化したところ，筆者らが提案しているひび割れ量推定手法の大変形時におけるひび割れ幅－ひび割れ長さ関係の推定精度が向上した。

参考文献

- 1) 高橋典之，高橋絵里，中埜良昭：鉄筋コンクリート部材のひび割れ量推定モデルの検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，2009年，pp.859-864
- 2) 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，日本建築学会，2004年
- 3) 杉大地，石森明行，田嶋和樹，白井伸明：スキャナを用いた変位およびひび割れ幅計測結果に基づくRC部材の損傷評価（その2）せん断ひび割れ幅－せん断変形関係の定量的評価モデルの提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，2007年，pp.373-374
- 4) 滝本和志，長澤保紀，石井清：ひび割れデータを用いたRC部材の損傷度評価に関する実験的研究，土木学会論文集，No.760/V-63，2004年，pp.135-145
- 5) CEB-FIP：Model Code for Concrete Structures，1978
- 6) Takahashi, N., Takahashi, E. and Nakano, Y.: Experimental Study on Damage Quantification of R/C Members Under Earthquakes, Proc. of the Ninth U.S. National and Tenth Canadian Conference on Earthquake Engineering, 2010, Paper No.237
- 7) 高橋典之，權淳日，前田匡樹，五十嵐さやか，チョビョンミン，金順実，田尻清太郎，向井智久：地震によるRC造建築物の損傷状況・機能維持に着目した実大試験体実験 その5 画像処理手法を用いた柱梁部材のひび割れ量分析，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），B-1，2010年，pp.79-80