

論文 鉄筋コンクリート部材のひび割れ量推定モデルの検証

高橋 典之*1・高橋 絵里*2・中埜 良昭*3

要旨：鉄筋コンクリート梁部材の静的載荷実験を実施し、ひび割れ幅、ひび割れ長さ、ひび割れ角度などの損傷量をひび割れ量として計測した。計測結果を用いて、経験部材角に対するひび割れ量の変化を整理するとともに、鉄筋コンクリート構造部材に関する既往の幾何学的なひび割れ-変形モデルを応用したひび割れ幅・ひび割れ長さ推定モデルの検証を行った。曲げ破壊型試験体 (F-1 試験体) では変位履歴から推定されるひび割れ幅推定値が計測値を概ね近似するが、せん断破壊型試験体 (S-1 試験体) ではひび割れ幅推定値が計測値をうまく近似できない場合があり、ひび割れ総長さを過小評価する可能性がある。

キーワード：ひび割れ幅、ひび割れ長さ、損傷量推定手法

1. はじめに

地震に対する構造的被害のみならず経済的被害の最小化が注目されるようになり、建物の耐震性能として修復性能あるいは復旧性能に着目した研究が進められ、損傷発生箇所の限定や残留変形の抑制を計画する設計手法が検討されるようになってきた¹⁾。損傷制御設計の有効性を評価するには、損傷制御設計されていない建物に比べて修復性能あるいは復旧性能がどれだけ向上しているのかを判断する必要があるが、そのためには、修復性能あるいは復旧性能が定量的に表示されなければならない。

これまで筆者らは、鉄筋コンクリート建築構造物を対象に、既往の損傷指標^(例えば²⁾)に対して「修復費用関数」をあてがうことで修復性能を定量的に評価する方法について検討を行ってきた³⁾。本論文では、修復費用関数の算出根拠となる損傷量をひび割れ幅とひび割れ長さを組合せた量(ひび割れ量)と定め、筆者らが実施した鉄筋コンクリート梁部材の静的載荷実験⁴⁾結果を用いて、筆者らが提案している幾何学的なひび割れ-部材変形モデルに基づくひび割れ量推定手法⁵⁾の検証を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体は約 1/3 スケールの縮小試験体で、曲げ破壊試験体 (F-1 試験体) 1 体、せん断破壊試験体 (S-1 試験体) 1 体の計 2 体である。試験体寸法(部材断面 200mm×240mm、危険断面から反曲点位置までの部材高さ 850mm) および、その他の幾何学的形状(主筋径・本数、せん断補強筋径・間隔、かぶり厚)はすべて同一とし、材料強度の違いで破壊形式が異なるように試験体を計画した。図-1 に試験体の部材寸法と配筋詳細を、表-1 に試験体一覧を示す。損傷量計測を目的とした本実験で

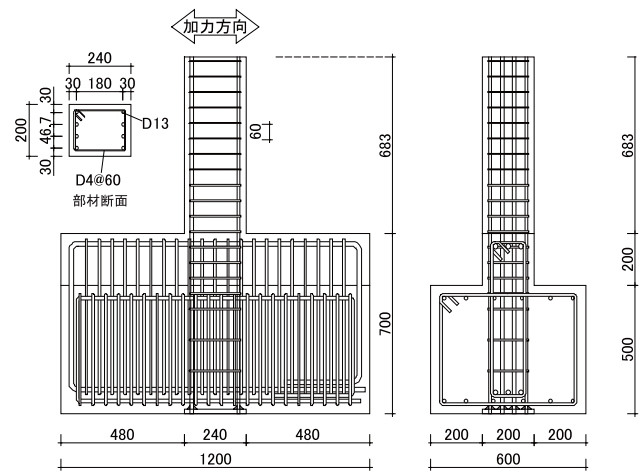


図-1 試験体詳細 (単位: mm)

表-1 試験体一覧

試験体名	コンクリート強度 [N/mm ²]	主筋引張鉄筋比	主筋降伏強度 [N/mm ²]	せん断補強筋・せん断補強筋比	せん断補強筋降伏強度 [N/mm ²]
F-1	30	8-D13	295	D4@60	295
S-1	18	0.0121	785	0.0022	295

は、実験期間が長期に渡ると予想されたので、実験作業の合間に新しいひび割れの進展や拡幅が起こらないよう軸力を導入しない梁試験体とし、危険断面付近のひび割れ計測を容易にするため、試験体面とスタブ上部とが同一平面となるスタブ形状とした。

2.2 載荷計画

図-2 に載荷装置図を、図-3 に載荷履歴を示す。部材角±1/500, ±1/250, ±1/150, ±1/100, ±1/75, ±1/50, ±1/50, ±1/37.5, ±1/25[rad]の順で正負交番載荷を行い、最後に+1/10[rad]まで片押しして載荷を終了した。ただし各載荷とも除荷後に小振幅を経験させ、部材角が概ねゼロ(原点近傍)を目指す載荷計画とした。これは、地震応答終了時の残留変位が、ピークからの除荷時変位に

*1 東京大学 生産技術研究所 助教 博(工) (正会員)

*2 三井住友建設(株) 設計本部 修(工) (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所 教授 工博 (正会員)

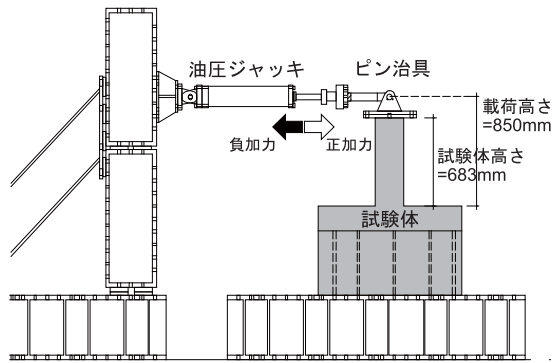


図-2 荷装置置図

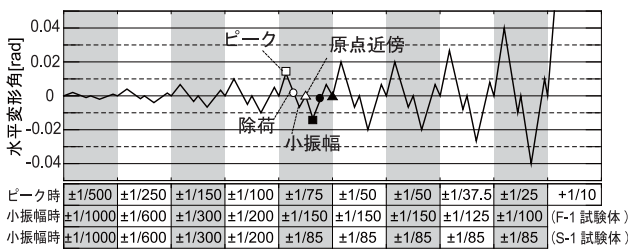


図-3 荷履歴

る場合と、ほぼゼロ（原点近傍）になる場合の2通りについて、それぞれの損傷量がどのように表されるのかを検討するために計画したものである。

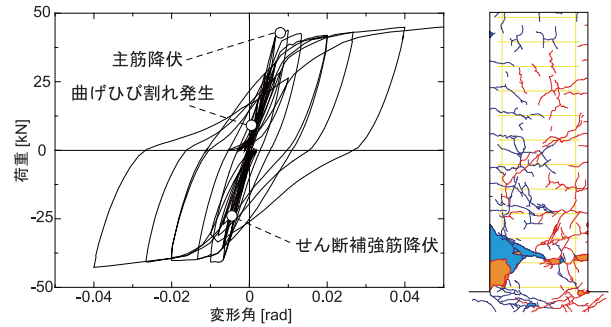
2.3 実験結果概要

図-4 に F-1 および S-1 試験体の荷重-変形関係および±1/25 サイクル終了時の破壊状況を示す。F-1 試験体の破壊経過は、+1/500[rad]サイクル荷重途中で曲げひび割れが確認され初期剛性が低下し、その後、試験体脚部を中心に曲げひび割れおよび曲げせん断ひび割れが伸展した。+1/100[rad]サイクル荷重途中で引張側主筋が降伏し、剛性低下した。S-1 試験体の破壊経過は、+1/500[rad]サイクル荷重途中で曲げひび割れが確認され初期剛性が低下し、+1/100[rad]サイクルピーク時に試験体中央に明瞭なせん断ひび割れが発生した後、せん断ひび割れが伸展した。-1/75[rad]サイクル荷重途中でせん断補強筋が降伏するとスリップする履歴を示すようになり、+1/37.5[rad]サイクル以降、付着割裂ひび割れが試験体全域へと伸展した。高強度鉄筋を使用した主筋は明瞭な降伏を示さず、最大耐力を示した±1/37.5[rad]のサイクル以降は、耐力が徐々に低下した。

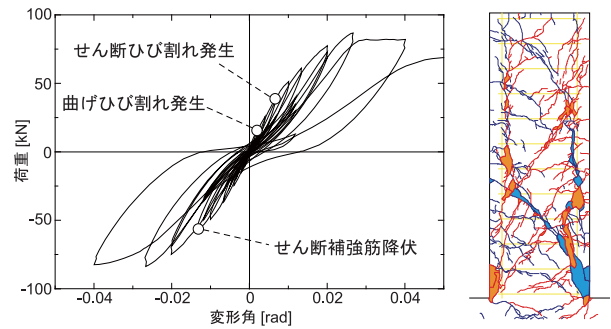
2.4 ひび割れ量の抽出

(1) 最大ひび割れ幅および平均ひび割れ幅

実験時に計測したひび割れ幅のほか、画像として取得した試験体表面の損傷状態から、ひび割れ幅、長さ、角度といったひび割れ量に関する情報を抽出し⁹⁾ ひび割れ量の進展過程を求める。但し、剥落部分のひび割れは対象としない。図-5 は、最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の部材角ごとの推移を示した図である。ここでは、最

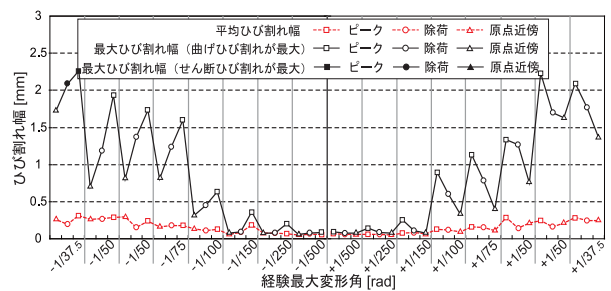


(a) F-1 試験体

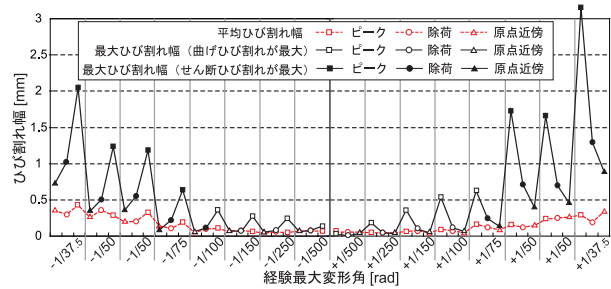


(b) S-1 試験体

図-4 荷重-変形関係・±1/25[rad] 終了時の破壊状況



(a) F-1 試験体



(b) S-1 試験体

図-5 最大ひび割れ幅および平均ひび割れ幅の推移

大ひび割れ幅を、クラックスケールを用いて計測した曲げひび割れ幅およびせん断ひび割れ幅の最大値とした。F-1 試験体では、部材角-1/37.5[rad]のサイクルを除き、曲げひび割れにおいて最大ひび割れ幅が生じており、S-1 試験体では、部材角±1/100[rad]以下では曲げひび割れ幅において最大ひび割れ幅が、部材角±1/100[rad]より大きな変形角ではせん断ひび割れにおいて最大ひび割れ幅が生じている。一方、平均ひび割れ幅は、CCD スキャナを用いて取得した試験体表面の損傷状態の画像を画像

処理⁶⁾することで、ある区間に区分されたひび割れの最大ひび割れ幅に該当区間のひび割れ長さを乗じ、これらの総和をひび割れの総長さで除した値として定めた。ここで区間最大ひび割れ幅を用いたのは、修復性能評価において補修区間のひび割れ修復費用積算に際し、区間の最大ひび割れ幅を基準に補修工法が選択されると仮定してのことである。

図-6 に最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の比の推移を示す。CEB-FIP Code 1978⁷⁾によれば、平均ひび割れ幅 w_{av} と最大ひび割れ幅 w_{max} との関係は、曲げひび割れについては概ね、

$$w_{max} = 1.7 \cdot w_{av} \quad (1)$$

と表され、せん断ひび割れについては概ね、

$$w_{max} = 1.7 \cdot \kappa_w \cdot w_{av} \quad (2)$$

と表される。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で、せん断補強筋が材軸となす角度が 90° のあばら筋の場合 $\kappa_w=1.2$ 、 $45 \sim 60^\circ$ のあばら筋の場合 $\kappa_w=0.8$ である。図-6 において、画像処理で除去できなかった微細線ノイズの残留量により平均ひび割れ幅が小さめに算出される可能性があり、定量的な傾向を述べるのは困難であるが、定性的には除荷時および原点近傍時において上記の式が概ね成立している一方、ピーク時において最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の比が(1)式および(2)式右辺の係数よりも数倍大きいことが読み取れる。すなわち、ピーク時には最大ひび割れ幅となるひび割れのみが顕著に開く（そのひび割れに変形が集中する）ことになる。また、部材角 $\pm 1/100[\text{rad}]$ を超えて変形が大きくなるにつれ、最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の比も大きくなる傾向にある。すなわち、部材角が大きくなると最大ひび割れ幅となるひび割れに変形が集中することになる。

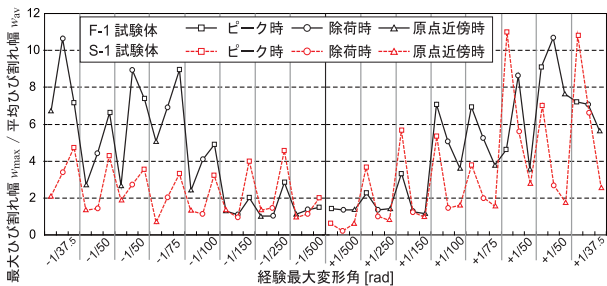


図-6 最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の比の推移

(2) ひび割れ総長さ

図-7 に部材角ごとのひび割れ総長さの推移を示す。ここでは、ひび割れ総長さを2通りの方法で計測している。1つめの方法は、各サイクルで描いたひび割れ図を

画像処理⁶⁾することで、試験体面に生じたひび割れ総長さを計測する方法である。もう1つの方法は、CCD スキャナを用いて取得した試験体表面の損傷状態の画像を画像処理することで、ひび割れ総長さを計測する方法である。ひび割れ図をもとに計測したひび割れ総長さは、ひび割れ幅の大小に関わらず（閉じてしまったひび割れがあっても）一度ひび割れとして認識された部分が剥落によって欠損するまで画像情報として維持されるため、荷重が進むに従い単調増加する。一方、CCD スキャナを用いて取得した画像をもとに計測したひび割れ総長さは、ひび割れが閉じて幅がほぼゼロになっているひび割れを認識しないため、ピーク時、除荷時、原点近傍時でひび割れ総長さが変化する。また、画像取得時の荷重の向きと反対方向の荷重で生じたひび割れが閉じているために認識されないひび割れが影響し、ひび割れ図から計測したひび割れ総長さよりも CCD スキャナを用いて取得した画像をもとに計測したひび割れ総長さは概ね小さな値となっている。但し、画像取得時に CCD スキャナと試験体面が密着せず、取得画像に生じた陰影により処理できない微細線ノイズが残留し、F-1 試験体の +1/500[rad] サイクルピーク時および +1/250[rad] サイクルピーク時で、ひび割れ総長さが正確に計測できなかった。

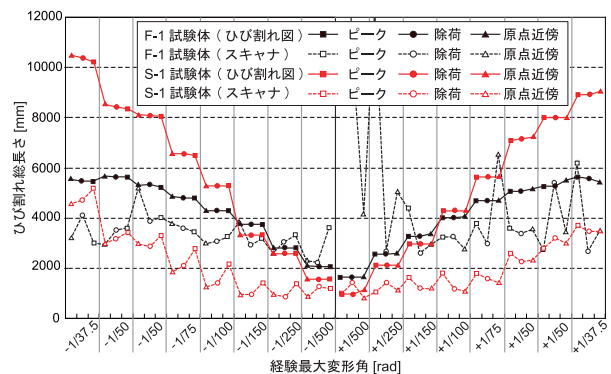


図-7 ひび割れ総長さの推移

(3) ひび割れ角度

ひび割れ角度は各サイクルで描いたひび割れ図から区分長さあたりのひび割れの伸展方向（材軸となす角度）を画像処理によって計測した。本論文では材軸となす角度を6つに分類して（ $0 \sim \pi/2[\text{rad}]$ の間を $\pi/12[\text{rad}]$ おき区分して）、各々に含まれる区分ひび割れ長さの和がひび割れ総長さに対して占める割合をひび割れ角度の分布と定めた。ひび割れ角度の分布を図-8 に示す。図-8 より、F-1 試験体では、部材角が大きくなってもひび割れ角度の分布に大きな変化は生じず、常に $5\pi/12 \sim \pi/2[\text{rad}]$ 方向に伸展するひび割れ（曲げひび割れ）が多いことが定量的に示されている。また、S-1 試験体では、部材角が大きくなるにつれ、ひび割れ角度の分布に変化

が生じ、小さな部材角で卓越していた $5\pi/12 \sim \pi/2$ [rad] 方向に伸展するひび割れ（曲げひび割れ）の割合が減り、徐々に $\pi/6 \sim \pi/4$ [rad] 方向に伸展するひび割れ（せん断ひび割れ）の割合が増加することが定量的に示されている。

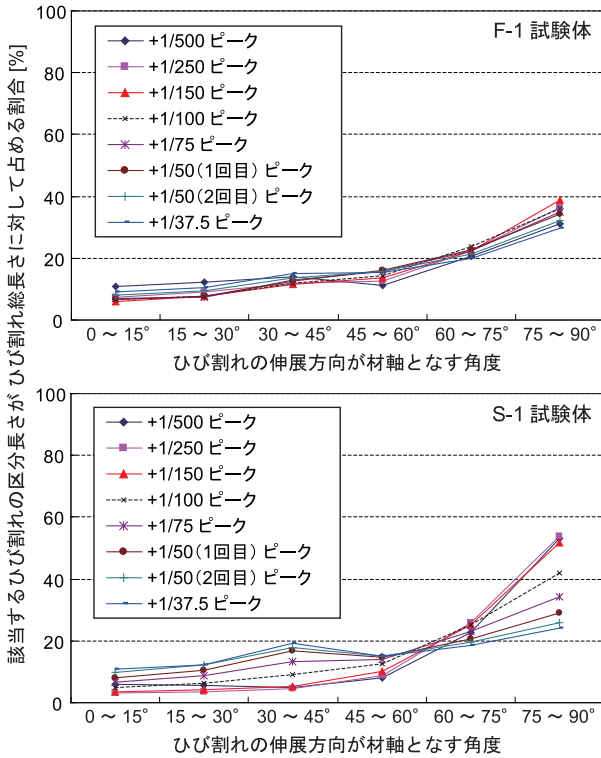


図-8 ひび割れ角度の分布

以上のひび割れ量抽出結果をもとに、次章では、幾何学的モデルを用いたひび割れ量推定手法の検証を行う。

3. ひび割れ量推定手法の検証

3.1 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⁵⁾は、既往の幾何学的なひび割れ-変形モデルに、離散化した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離散化したもの）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」⁸⁾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-9に示す幾何学的なモデルを用いて説明している。しかし近年実施された杉らの実験⁹⁾によって、この幾何学的モデルでは、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9)に従ってせん断ひび割れ幅とせん断変形の関係を補正し、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、

$$R = R_f + R_s = \frac{\sum w_f}{D - x_n} + \frac{2 \sum w_s \cdot \cos \theta}{L} \quad (3)$$

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。

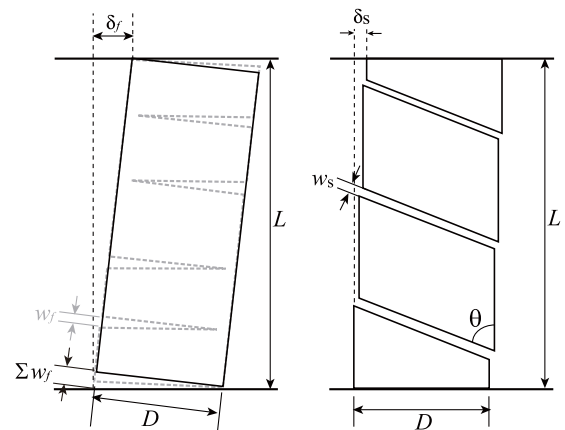


図-9 幾何学的なひび割れ-変形モデル⁸⁾

(2) ひび割れ幅分布形状の特定

文献8)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。言い換えると、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。そこで、全てのひび割れに対してひび割れ幅の合計がどのように分解されるのかを把握するために、ひび割れ幅分布モデルを特定する。

滝本らの実験結果¹⁰⁾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10)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

$$w_{av} = E(X) = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (4)$$

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} ⁷⁾ 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

$$l_{av} = \frac{\zeta \cdot L \cdot (D - x_n)}{S_{av}} \quad (5)$$

と定める (図-10)。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⁷⁾ 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

$$l_{av} = \frac{D}{\sin \theta} \left(\frac{D \cos \theta + L \sin \theta}{S_{av}} - 2q \right) + \frac{q \cdot (q+1) \cdot S_{av}}{\sin \theta \cos \theta} \quad (6)$$

と定める (図-11)。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。

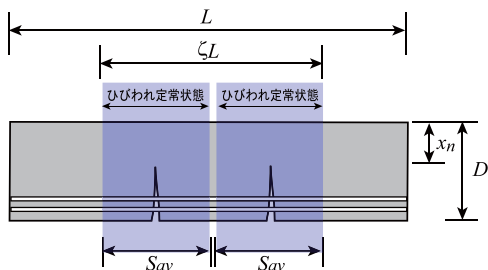


図-10 曲げ変形に対する平均ひび割れ総長さ

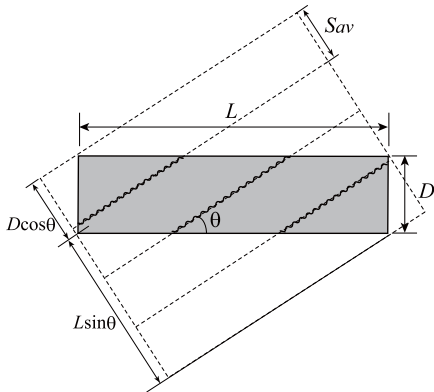


図-11 せん断変形に対する平均ひび割れ総長さ

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、

$$l_{av} = \sum_{i=1}^{n_{class}} \left[round \left\{ \frac{f \left(\frac{2i-1}{2n_{class}-1} \cdot w_{max} \right)}{f(w_{max})} \right\} \right] \cdot l_{1,max} \quad (7)$$

と表される。本推定手法では、降伏前は、曲げ変形については(7)式が $0.5 \times (5)$ 式と、せん断変形については(7)式が $0.5 \times (6)$ 式と等しくなる (近似する) ように、降伏後は、曲げ変形については(7)式が(5)式と、せん断変形については(7)式が(6)式と等しくなる (近似する) ように、階級数 n_{class} を定めることにした。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、

$$l_{1,max} = D - x_n \quad (8)$$

せん断変形の場合、

$$l_{1,max} = \frac{D}{\sin \theta} \quad (9)$$

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_{wi} 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、

$$l_{wi} = \frac{\int_{w_i-\alpha}^{w_i+\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot x} \exp \left(\frac{-(\ln x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right) dx}{\int_{w_{max}-\alpha}^{w_{max}+\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot x} \exp \left(\frac{-(\ln x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right) dx} \cdot l_{1,max} \quad (10)$$

のように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、

$$l_{av} \geq \sum_{i=1}^{n_{class}} l_{wi} \quad (11)$$

なる条件を満たすように、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。

以上より、(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 Σw を求め、(2)最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の関係を用いてひび割れ幅分布形状を特定し、(3)特定したひび割れ幅分布を最大ひび割れ幅 w_{max} が上限となるひび割れ幅階級により離散化することで、ひび割れ幅の合計 Σw をひび割れ幅分布に従って各ひび割れ幅階級に分解させたときの各階級のひび割れ長さを、(4)最大ひび割れ幅となるひび割れの長さ $l_{1,max}$ の比として求めることができる。

3.2 ひび割れ量推定手法の検証例

(1) ひび割れ幅についての検証

変位履歴および曲げ成分比 (全体変形のうち曲げ変形成分が占める割合) を実験結果とあわせて推定した最大ひび割れ幅および最大ひび割れ幅計測値の部材角ごとの推移を図-12に示す。図-12より、F-1試験体では、変位履歴から推定されるひび割れ幅推定値と計測値が概ね近似するが、S-1試験体では、ピーク時のせん断ひび割れ幅推定値は計測値より大きく、除荷時、原点近傍時の推定値は計測値より小さい。これは、せん断ひび割れ幅に対して(3)式のせん断ずれ量がピーク時で過小評

値、除荷時で過大評価になっているためと考えられる。

(2) ひび割れ総長さについての検証

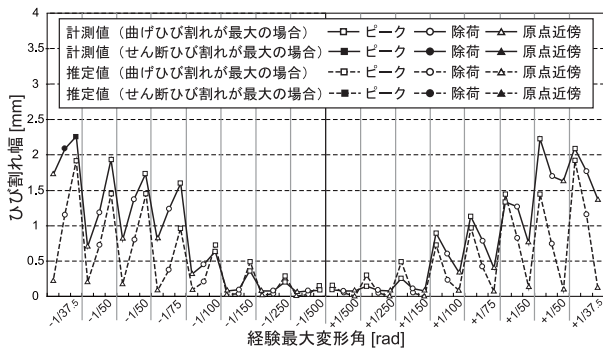
平均ひび割れ総長さはひび割れ定常状態（これ以上新たなひび割れが発生しない状態）にあるひび割れ長さの総和として得られるものであり、経験部材角によらず、試験体が一つに定まればその値も一意に定まる。この平均ひび割れ総長さを、ひび割れ総長さを求める際の上限とする妥当性について、F-1 および S-1 試験体を対象に検討する。両試験体の平均ひび割れ総長さを求め図-7のひび割れ総長さグラフに重ねると図-13を得る。図-13より、F-1 試験体では平均ひび割れ総長さをひび割れ総長さの上限として考えても概ね妥当であると言えるが、S-1 試験体では±1/75[rad]以降、平均ひび割れ総長さよりもひび割れ総長さが大きくなる。本モデルでは付着

割裂ひび割れの進展をひび割れ総長さに考慮していないため、ひび割れ総長さを過小評価したと考えられる。

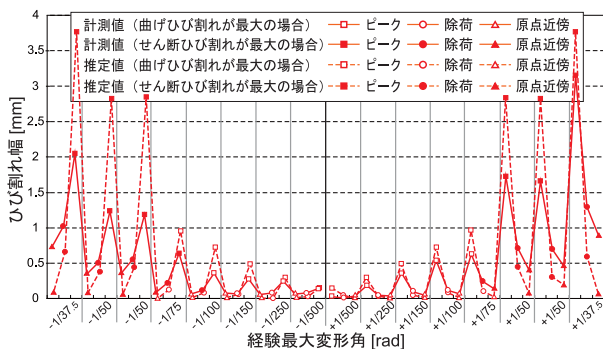
4. まとめ

鉄筋コンクリート梁部材の静的載荷実験を実施し、ひび割れ幅、ひび割れ長さ、ひび割れ角度などの損傷量をひび割れ量として計測した。計測結果を用いて、幾何学的ひび割れ-変形モデルに離散化したひび割れ幅分布をあてはめてひび割れ幅別にひび割れ長さを推定するひび割れ量推定手法の検証を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) F-1 試験体では、変位履歴から推定されるひび割れ幅推定値とひび割れ幅計測値が概ね近似するが、S-1 試験体では、ひび割れ幅推定値がひび割れ幅計測値をうまく近似できない場合がある。
- (2) F-1 試験体では、平均ひび割れ総長さをひび割れ総長さの上限として考えても概ね妥当であると言えるが、S-1 試験体では、平均ひび割れ総長さよりもひび割れ総長さが大きくなる場合があり、ひび割れ総長さを過小評価する可能性がある。



(a) F-1 試験体



(b) S-1 試験体

図-12 最大ひび割れ幅計測値と推定値の比較

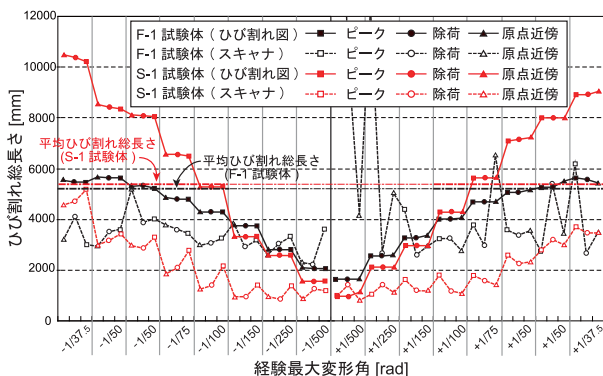


図-13 平均ひび割れ総長さ l_{av} とひび割れ総長さの比較

参考文献

- 1) 和田章, 岩田衛, 清水敬三, 安部重孝, 川合廣樹: 建築物の損傷制御設計, 丸善, 1998.9
- 2) Y. J. Park and A. HS. Ang: Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.4, pp.722-739, Apr. 1985
- 3) 高橋典之, 塩原等, 楠原文雄: 鉄筋コンクリート構造物の耐震修復性能評価における修復費用関数, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1543-1548, 2005.6
- 4) 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進展課程に関する実験的研究 その1~その2, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp.499-502, 2008.9
- 5) 高橋典之, 中埜良昭: 複数回地震動を受ける鉄筋コンクリート構造物の損傷量推定手法に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1027-1032, 2008.7
- 6) 高橋絵里: 鉄筋コンクリート部材のひび割れ進展過程の定量的評価に関する実験的研究, 東京大学大学院修士論文, 2009.3
- 7) CEB-FIP: Model Code for Concrete Structures, 1978
- 8) 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, 2004.1
- 9) 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, pp.373-374, 2007.8
- 10) 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, pp.135-145, 2004.5