

# 論文 鉄筋コンクリート梁部材のひび割れ長さ進展過程に関する研究

高橋 典之<sup>\*1</sup>・中埜 良昭<sup>\*2</sup>

**要旨：**建築物に要求される耐震性能の一つとして建物の修復性能や損傷量の評価方法に着目した研究が進められている。鉄筋コンクリート造建物や部材を対象とした損傷量評価では、ひび割れ長さやひび割れ幅、コンクリートの剥落量を総合的かつ定量的に示す必要がある。本研究では、ひび割れ長さに着目し、鉄筋コンクリート部材の静的載荷実験を行い、ひび割れ発生間隔やひび割れ長さの進展について定量的な情報を得るとともに、断面解析を用いた簡便なひび割れ長さの推定手法を提案し、提案した推定手法の妥当性について検討を行った。

**キーワード：**損傷量推定手法、ひび割れ長さ、ひび割れ進展

## 1. はじめに

建築物に要求される耐震性能として安全性だけでなく、修復に伴う経済的被害を抑える修復性が注目されるようになり、地震時損傷量の評価方法に着目した研究が進められている<sup>(例えば 1), 2), 3)</sup>。鉄筋コンクリート造建物や部材を対象とした損傷量評価では、その評価の項目としてひび割れ幅、ひび割れ長さ、コンクリートの剥落量などが挙げられ、それらを総合的かつ定量的に示す必要がある。本研究ではひび割れ長さの進展過程に着目し、鉄筋コンクリート部材の静的載荷実験を行い、ひび割れの発生からひび割れ長さの進展過程について定量的な情報を取得するとともに、簡便なひび割れ長さ進展評価手法を提案し、評価手法の妥当性について検討を行う。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

試験体は梁部材を想定した約 1/2 スケールの縮小試験体で、曲げせん断ひび割れの曲げ部分が卓越する曲げ破壊型試験体 (F-60 試験体および F-90 試験体、せん断余裕度が 1.5 以上) 2 体と曲げせん断ひび割れのせん断部分が卓越する曲げせん断破壊型試験体 (FS-90 試験体、せん断余裕度が 1 程度) の計 3 体である。試験体名に示す数字はせん断補強筋間隔を表す。各試験体とも、部材

断面 (215mm×400mm)、危険断面から反曲点位置までの部材高さ (1018mm)、主筋の配筋は同一である。図-1 に各試験体の部材寸法および配筋詳細を、表-1 に材料諸元およびせん断余裕度を示す。

本試験体では、予期しない初期ひび割れが外力と無関係なひび割れ発生および進展を誘発しないよう、ひび割れ発生位置の制御を目的として、写真-1 に示すステンレス板 (厚さ=0.02mm, 埋め込み深さ=10mm) を試験体打設前に材軸方向に 30mm 間隔で挿入し、載荷時引張側幅面全域にスリットを設けている。30mm 間隔は、予想される曲げひび割れ発生間隔の数分の 1 程度で、コンクリートが型枠内を十分に充填しスリットが施工できる最小限の間隔である。

### 2.2 載荷および計測方法

水平一方向の片側押し切り載荷とし、軸力をゼロとした。載荷時に変形角 (試験体頂部の水平変位を試験体高さ=834mm で除した値) が 1/5000, 1/2000, 1/1000, 1/500, 1/250, 1/150, 1/111, 1/100, 1/75, 1/50, 1/37.5, 1/25[rad.] に到達した段階でひび割れ幅およびひび割れ長さの計測を行った。ただし、上記以外にひび割れが目視により確認できる最初の変形角についてもひび割れ幅およびひび割れ長さの計測を行った。図-2 に本実験の載荷装置図を、図-3 にひび割れ幅計測箇所の概略を示す。

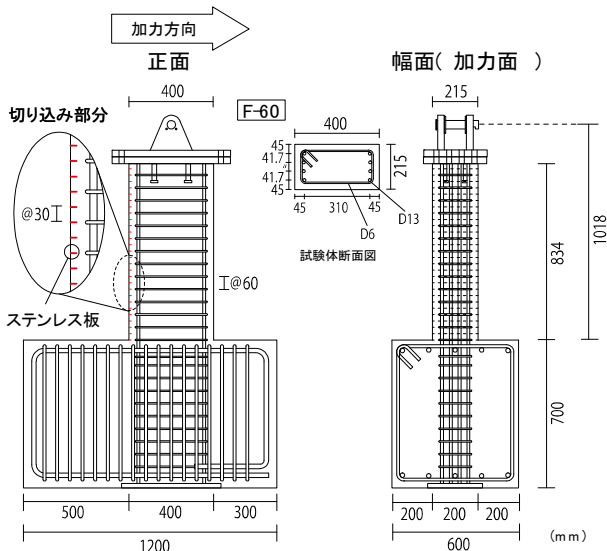
表-1 材料諸元およびせん断余裕度

試験体	コンクリート 圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	コンクリート 引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	主筋 (引張鉄筋比)	主筋降伏強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	補強筋 (補強筋比)	補強筋降伏強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	せん断余裕度 (Q <sub>su</sub> */Q <sub>mu</sub> **)
F-60	30.5	2.2	8-D13 (0.0067)	413 (SD295)	D6@60 (0.0049)	418 (SD295)	2.21 (145.6/68.8)
F-90	32.0	2.4			D6@90 (0.0033)	387 (SD345)	1.98 (130.3/65.8)
FS-90	32.5	1.9	8-D16 (0.0104)	569 (SD490)	φ9@90 (0.0066)	358 (SR235)	1.14 (161.4/142.1)

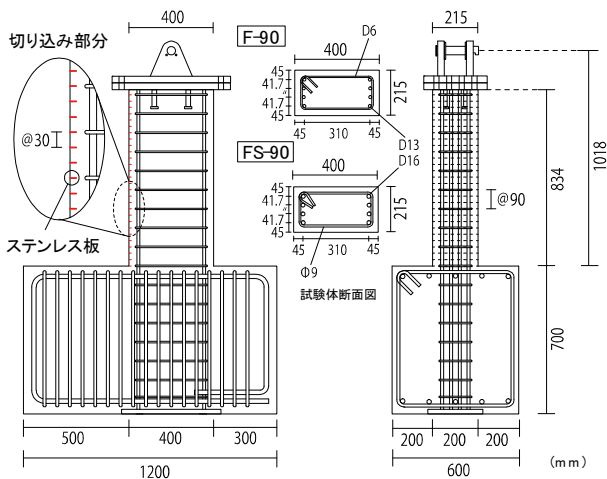
\*荒川(mean)式 \*\*日本建築学会 RC 規準略算式

\*1 東京大学 生産技術研究所 助教 博(工) (正会員)

\*2 東京大学 生産技術研究所 教授 工博 (正会員)



(a) F-60 試験体



(b) F-90 および FS-90 試験体

図-1 試験体配筋詳細

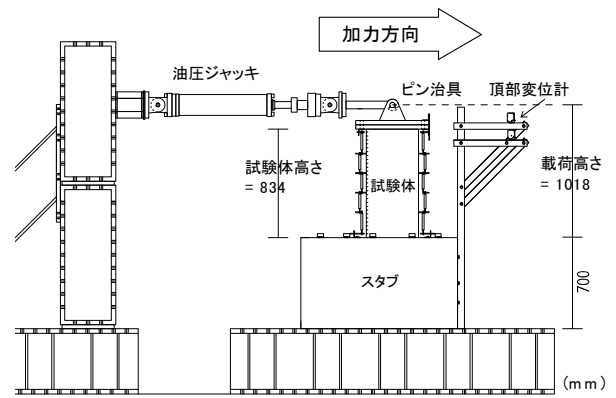


図-2 荷重装置全景

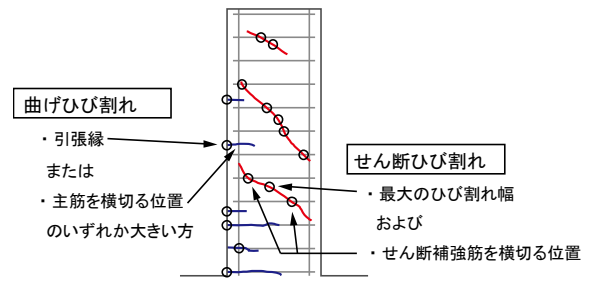


図-3 ひび割れ幅計測箇所

### 2.3 実験結果

図-4 に各試験体の荷重-変形関係と最終破壊状況を、図-5 にひび割れ長さの推移を、図-6 に最大ひび割れ幅の推移を、図-7 に平均曲げひび割れ間隔の推移を、図-8 に曲げひび割れ発生位置の推移を示す。

F-60 試験体は、3つの試験体のうち最も総ひび割れ長さが短く、曲げひび割れ長さは降伏 ( $1/150[\text{rad}]$ 付近) までは増加するが降伏後はほぼ一定の値となり、曲げせん断ひび割れのせん断部およびせん断ひび割れの長さは降伏後わずかに増加した (図-5)。最大ひび割れ幅は、曲げひび割れで生じた最大ひび割れ幅がせん断ひび割れで生じた最大ひび割れ幅の 1.5 倍程度で推移した (図-6)。平均曲げひび割れ間隔は、ひび割れが危険断面から等間隔で順に生じるわけではないため (図-8)、既往の平均ひび割れ間隔評価式 (森田式<sup>4)</sup>, CEB-FIP Code 1978<sup>5)</sup>, Euro Code2-1991<sup>6)</sup>, III種 PC 式<sup>7)</sup>) より降伏前では大きな値となるが、降伏後はほぼ一定となり、本試験体では森田式<sup>4)</sup>に近い値を示した (図-7)。

F-90 試験体は、F-60 試験体と似たひび割れ長さの推移を示し、曲げひび割れ長さは降伏 ( $1/125[\text{rad}]$ 付近) までは増加するが降伏後はほぼ一定の値となり、曲げせん断ひび割れのせん断部およびせん断ひび割れの長さは降伏後わずかに増加した (図-5)。最大ひび割れ幅は、曲げひび割れが顕著に開く一方、せん断ひび割れ幅はあまり開かなかった (図-6)。平均曲げひび割れ間隔は、F-60 試験体同様、降伏後に森田式<sup>4)</sup>に近い値を示した (図-7)。

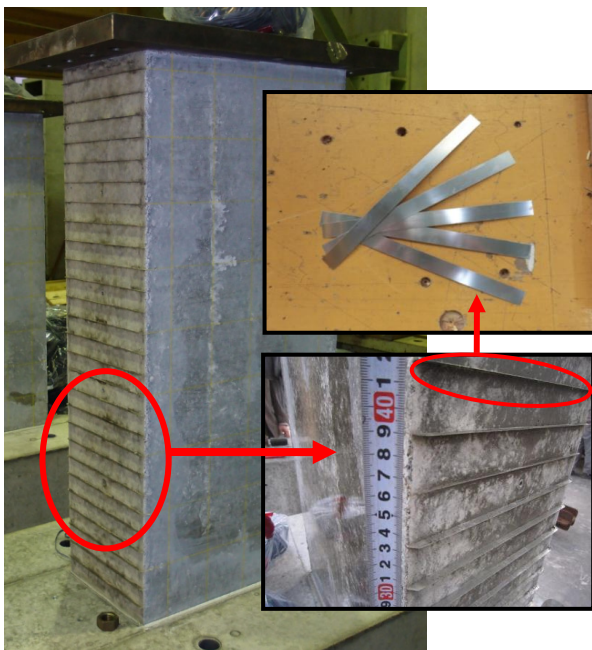
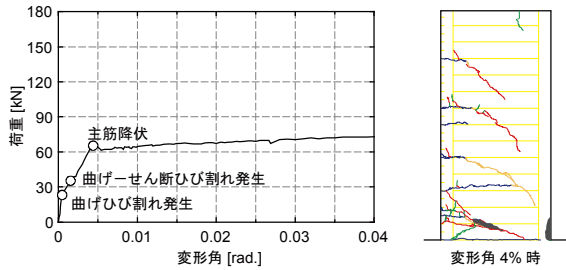
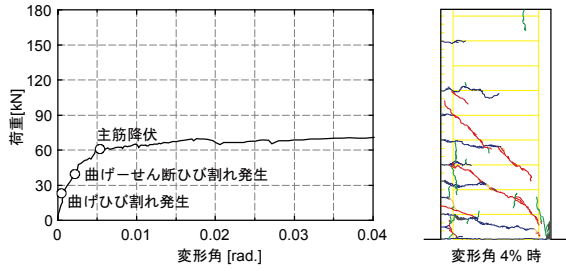


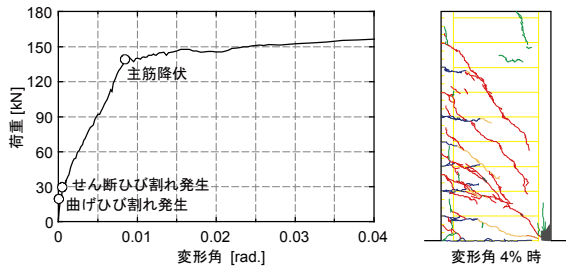
写真-1 ひび割れ発生位置制御用スリットの導入



(a) F-60 試験体



(b) F-90 試験体



(c) FS-90 試験体

図-4 荷重-変形関係および破壊状況

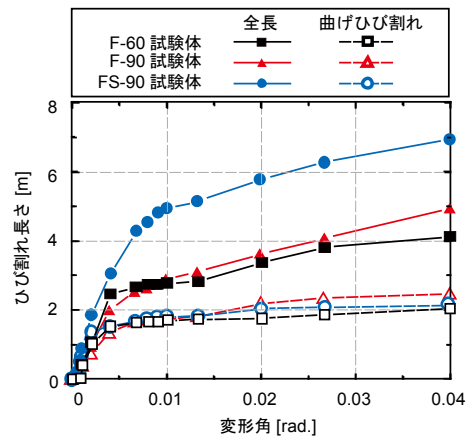


図-5 ひび割れ長さの推移

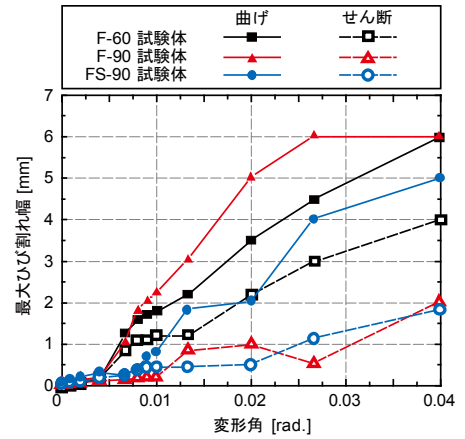


図-6 最大ひび割れ幅の推移

FS-90 試験体は、3つの試験体のうち最も総ひび割れ長さが長く、曲げひび割れひび割れ長さは降伏(1/125[rad.]付近)まで増加して降伏後はほぼ一定の値となるが、曲げせん断ひび割れのせん断部およびせん断ひび割れ長さは降伏後も増大し続けた(図-5)。最大ひび割れ幅については、他の2体に比べて小さめに推移した(図-6)。平均曲げひび割れ間隔は、降伏後、森田式<sup>4)</sup>に近い値を示した(図-7)。

ちなみに、ひび割れの分類は図-9に従った。まず、ひび割れの始端と終端を結ぶ線分について、材軸となす角が75°以上105°以下であれば曲げひび割れ、15°以上75°未満ならせん断ひび割れとし、曲げせん断ひび割れについては、ひび割れ始

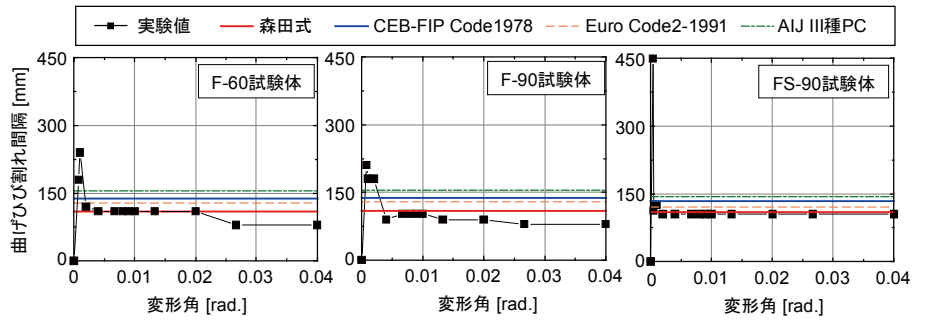


図-7 平均曲げひび割れ間隔の推移

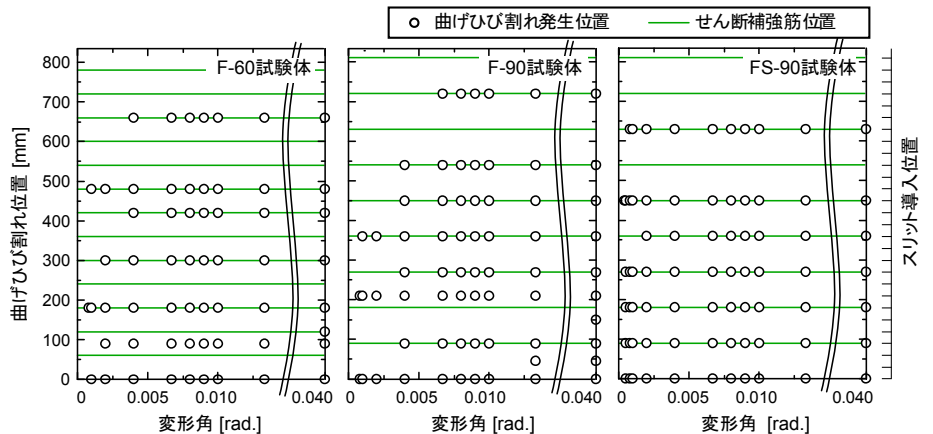
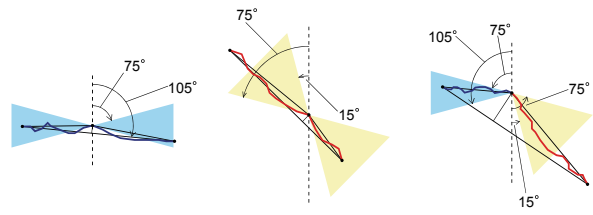


図-8 曲げひび割れ発生位置の推移

端と終端を結ぶ直線から最も離れた点を折れ曲がり点とし、この点を境に「曲げ」と「せん断」の区間に区分されるものとした。図-4のひび割れ図では上記に応じて、青：曲げ、赤：せん断、橙：曲げからせん断に進展したせん断部、緑：その他に分類している。また、後述するひび割れ長さ進展評価手法では、ひび割れを図-9に示した分類に従う線分として取り扱うこととした。



(a)曲げひび割れ (b)せん断ひび割れ (c)曲げせん断ひび割れ  
図-9 ひび割れの分類

### 3. ひび割れ長さ推定手法

#### 3.1 ひび割れ長さ推定手法の適用対象

本研究では、曲げ、曲げせん断およびせん断ひび割れ長さの簡便な推定手法を提案する。曲げひび割れ長さおよび曲げせん断ひび割れ長さの進展は、曲げ理論に基づく断面解析により推定し、せん断ひび割れ長さの進展は想定したせん断ひび割れ発生直線状のせん断ひび割れ進展角度直交方向の歪度から推定することとした。曲げひび割れ長さと曲げせん断ひび割れ長さを曲げ理論に基づく断面解析により可能と判断した根拠は、筆者らが行った曲げせん断ひび割れの開閉角度の検討<sup>8)</sup>により、曲げせん断ひび割れの開閉と部材変形の関係が曲げひび割れと同一のメカニズムで（破壊モードがモードIになるものとして）説明できるためである。曲げ、曲げせん断およびせん断ひび割れ以外のひび割れ（例えば、付着割裂ひび割れ等）は対象としていない。

#### 3.2 荷重-部材角関係および荷重-歪度関係の評価

本研究で用いる簡便な断面解析は平面保持、完全付着を仮定しており、主筋の抜け出し変形分を考慮できない。ひび割れ長さの推定においては、与条件として荷重（モーメント）を定め、当該モーメント時の部材変形角は抜け出し変形分を考慮する文献<sup>9)</sup>に基づき算定し、当該モーメント時の部材断面歪度は断面解析に基づき算定することとした。ちなみに、断面解析におけるコンクリート構成則は、圧縮側は修正 Kent&Park 式<sup>10)</sup>を用い、引張側は引張強度までを線形、その後は引張軟化曲線<sup>11)</sup>（引張軟化係数=1.0）に従うものとした。また、コンクリートの圧縮強度、引張強度、および鉄筋の降伏強度は、材料試験の値を用いることとし、鉄筋の構成則については降伏後に勾配を持たないバイリニア型とした。

#### 3.3 曲げひび割れ発生区間 $l_{cr}$ の設定とひび割れ本数 $n$

曲げひび割れ発生区間  $l_{cr}$  は、部材断面の引張縁のモーメントがコンクリート引張強度時モーメント  $M_c$  より大きな区間と定める。本試験体の材軸方向のモーメント分布が三角形分布であることから曲げひび割れ発生区間  $l_{cr}$  は、危険断面のモーメントを  $M$  ( $M \geq M_c$ ) とすると以下のように表せる。

$$l_{cr} = (1 - \frac{M_c}{M})H \quad (1)$$

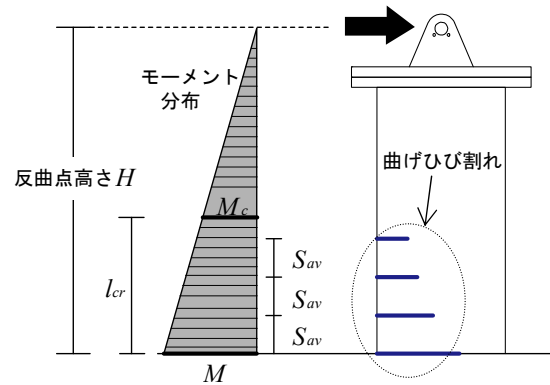


図-10 曲げひび割れ発生区間・本数の算出

ここに、 $H$ ：せん断スパンである。ひび割れ本数  $n$  は、危険断面を起点に、曲げひび割れ発生区間  $l_{cr}$  において平均曲げひび割れ間隔  $S_{av}$ （以下の検討では図-7より  $S_{av}$  として森田式<sup>4)</sup>を用いる）ごとに発生すると仮定すると、

$$n = \frac{l_{cr}}{S_{av}} + 1 \quad (2)$$

と表される。曲げひび割れ発生区間  $l_{cr}$  とひび割れ本数  $n$  の関係概略を図-10に示す。

#### 3.4 曲げひび割れ長さ

曲げひび割れ長さは、断面解析によって得られた部材断面モーメント-歪度関係より、引張縁から可視ひび割れ歪度  $\epsilon_{cr}$ （本研究では  $200\mu$  と仮定）に達した部分までを曲げひび割れ長さとする。その際、曲げひび割れは2章で前述したように線分化されており、常に材軸方向に直交しているものとする（図-10参照）。

#### 3.5 曲げせん断ひび割れの移行点

2章で言及した曲げせん断ひび割れの線分化（二直線化）における折れ曲がり点に相当し、曲げせん断ひび割れが曲げ区間からせん断区間に移行する点を、曲げせん断ひび割れの移行点と定める。本研究のひび割れ長さ推定手法では、曲げひび割れ先端部における軸応力とせん断応力から主応力の角度を算出し、図-9のひび割れ分類に基づき、主応力角度が  $15^\circ$  以内であれば曲げひび割れがそのまま進展、 $15^\circ$  以上であればひび割れがせん断ひび割れ方向に進展し、曲げせん断ひび割れに移行するものとした。

### 3.6 ヒンジ領域 $l_p$ と曲げせん断ひび割れ進展モデル

曲げひび割れの先端において、3.5 節で定めた移行点の条件にあてはまるひび割れは、曲げせん断ひび割れに移行する。曲げせん断ひび割れの進展においてはトラス機構を参考に、ヒンジ領域の内外でその進展方向が異なるものとした。まず、部材のヒンジ領域長さ  $l_p$ <sup>12)</sup> を、

$$l_p = j_e \cdot \cot \phi \quad (3)$$

と定める。ここで、 $j_e$  : せん断力方向へ外周せん断補強筋の芯々距離、 $\cot \phi$  : トラス機構の角度（本試験体では  $\cot \phi = 1$ ）を表す。3.5 節で定めた曲げせん断ひび割れの移行点がヒンジ領域内にある場合は、危険断面直近の圧縮側最外縁にあるせん断補強筋断面中心に向かってひび割れが進展するものとし、ヒンジ領域からせん断ひび割れ間隔  $S_{m\theta}$ <sup>9)</sup> 一つ分の「ヒンジ領域近接部」にある場合は材軸とのなす角  $\phi$  で進展するものとする。図-11 に曲げせん断ひび割れの進展方向の概略を示す。

曲げせん断ひび割れ長さの推定は、まず曲げせん断ひび割れ進展方向にある任意の点（断面せい方向 :  $X_{bs}$ 、材軸方向 :  $Y_{bs}$ 、ただし  $Y_{bs}$  は  $Y_{bs} \leq (j_e \cot \phi + S_{m\theta}) - X_{bs} / \tan \phi$ ）におけるモーメントを算定し、当該モーメント時の危険断面から距離（高さ） $Y_{bs}$  位置にある断面のコンクリート歪度分布を断面解析により求める。ここで、位置  $(X_{bs}, Y_{bs})$  の材軸方向の歪度  $\varepsilon$  を曲げせん断ひび割れの進展方向と直交方向の引張歪  $\varepsilon_{bs}$  に置換すると、

$$\varepsilon_{bs} = \frac{\varepsilon}{\sin \theta} \quad (4)$$

となる。ここに、 $\theta$  : 曲げせん断ひび割れのせん断部分が材軸となす角。(4)式より  $\varepsilon_{bs}$  の絶対値が可視ひび割れ歪度  $\varepsilon_{cr}$  の絶対値より大きければ点  $(X_{bs}, Y_{bs})$  に曲げせん断ひび割れのせん断部ひび割れが生じていると判断し、曲げひび割れ先端すなわち曲げせん断ひび割れの移行点  $(X_b, Y_b)$  と点  $(X_{bs}, Y_{bs})$  との距離を曲げせん断ひび割れのせん断部ひび割れ長さとする。図-12 に曲げせん断ひび割れの進展方向における歪度概念図を示す。

### 3.7 せん断ひび割れ進展モデル

前述したように、せん断ひび割れ長さの進展は想定したせん断ひび割れ発生直線状のせん断ひび割れ進展角度  $\phi$  に直交する方向の歪度から推定する。本研究では、想定されるせん断ひび割れ位置を、ヒンジ領域からせん断ひび割れ間隔  $S_{m\theta}$ <sup>9)</sup> 内に1本ずつ均等にひび割れが入るものと仮定する。

### 4. ひび割れ長さ推定結果と実験結果との比較

ひび割れ長さの推移および変形角1%時のひび割れ進展状況の推定結果と実験結果の比較を図-13に示す。

F-60試験体およびF-90試験体では、降伏前の曲げひび

割れ長さ増加分は概ね推定できるものの、降伏後の曲げおよび曲げせん断ひび割れ長さの進展を過小評価した。

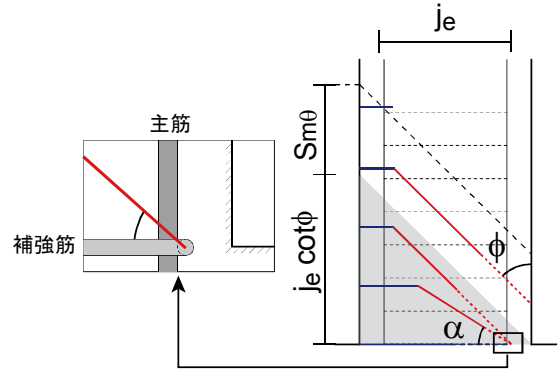


図-11 ヒンジ領域内外の曲げせん断ひび割れ進展方向

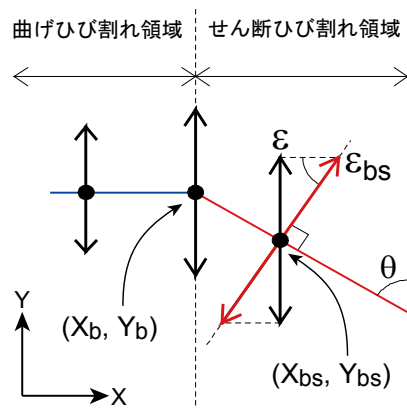


図-12 歪度算定値による曲げせん断ひび割れの歪度判定

せん断ひび割れ長さについては概ね推定できた。一方、ひび割れ進展状況は、簡便法であるため厳密に一致することはないが、ひび割れ進展状況の大まかな傾向は表現できていると思われる。

FS-90試験体では、曲げひび割れ長さ、曲げせん断ひび割れ長さ、せん断ひび割れ長さのいずれも実験結果を過小評価した。一方、ひび割れ進展状況の大まかな傾向は表現できていると思われる。

本推定手法ではひび割れを線分として扱っているため、ひび割れ進展状況の大まかな傾向は再現できても、ひび割れの複雑さ（フラクタル次元）が増すとひび割れ長さの推定値は実験結果を過小評価する傾向が現れているものと考えられる。

### 5. まとめ

鉄筋コンクリート梁部材の静的載荷実験を行い、ひび割れ発生間隔やひび割れ長さの進展について定量的な情報を得るとともに、断面解析を用いた簡便なひび割れ長さの推定手法を提案および妥当性検討の結果、以下の知見を得た。

(1)曲げひび割れ長さは全試験体で降伏後ほぼ一定の値を

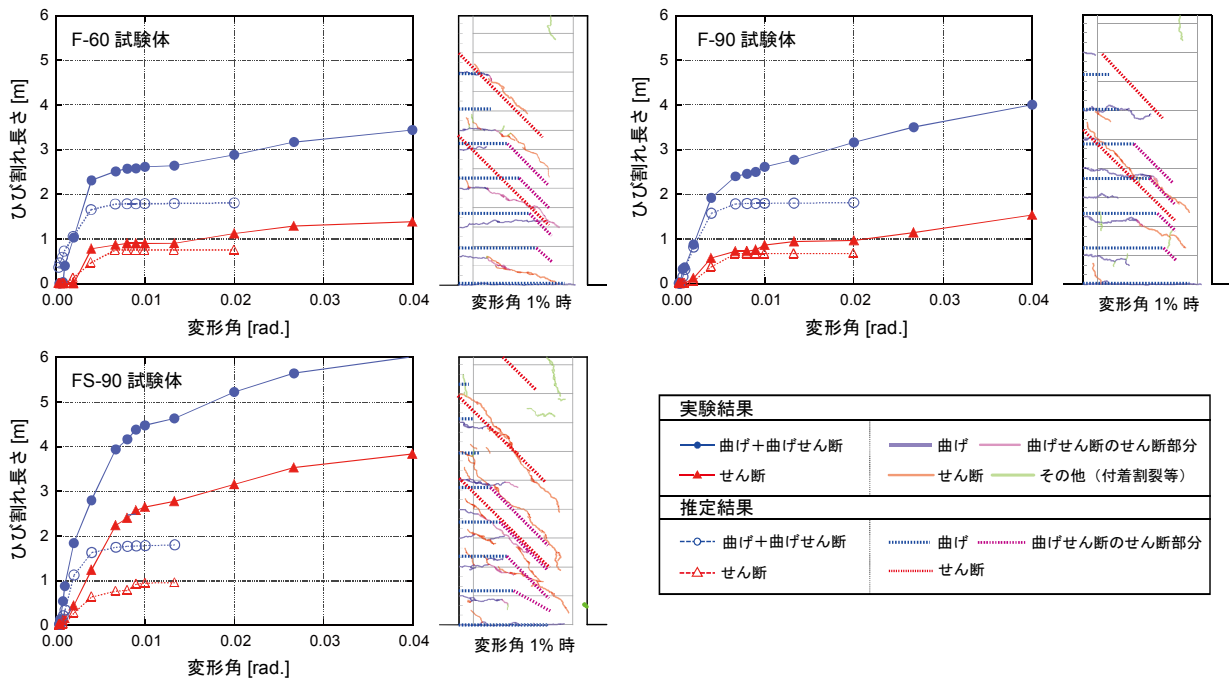


図-13 ひび割れ長さ、ひび割れ進展状況の推定結果と実験結果の比較

示したが、曲げせん断ひび割れのせん断部およびせん断ひび割れの長さは F-60 試験体と F-90 試験体では降伏後わずかに増加，FS-90 試験体では増大し続けた。

(2)最大ひび割れ幅は、ひび割れ長さの進展が比較的長い FS-90 試験体で、他の 2 体より小さくなった。

(3)ひび割れは危険断面から等間隔で順に生じるわけではなく、降伏前の平均曲げひび割れ間隔は大きな値となるが、降伏後はほぼ一定となり、本試験体では森田式に近い値を示した。また、曲げひび割れ間隔から外れたスリットは終局状態まで変化せず、ひび割れ発生および進展に影響しなかった。

(4)本推定手法では、ひび割れを線分として扱っているため、ひび割れ進展状況の大まかな傾向は再現できても、ひび割れ長さ推定値は実験結果を過小評価する。

今後、本研究で提案したひび割れ長さ推定手法の推定精度を向上させ、筆者らが既往の研究で提案してきたひび割れ幅推定手法<sup>13)</sup>およびひび割れ幅-ひび割れ長さ関係のモデル化<sup>14)</sup>と統合し、ひび割れ幅とひび割れ長さを統一的に推定する損傷量評価手法を確立させたい。

#### 参考文献

- 1) 青木貴，前田匡樹：RC造建物の耐震修復性及び修復限界状態の評価を目的とした損傷量評価法の提案，日本建築学会構造系論文集，Vol.77，No.679，pp.1437-1443，2012.9
- 2) 加藤博人ら：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 1～その 10，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp.71-90，2010.9
- 3) 向井智久，斉藤大樹，衣笠秀行，福山洋：非耐力壁を有する

- 実大 RC 造架構の修復性能評価に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1051-1056，2008.7
- 4) 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.9，1973.9
- 5) CEB-FIP：Model Code for Concrete Structures,1978
- 6) A.W.Beeby and R.S.Narayanan：Designers' Handbook to Eurocode 2，1995
- 7) 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，日本建築学会，2003.4
- 8) 伊藤洋一，高橋典之ほか：脆性部材を有する RC 造架構の構造性能評価に関する実験 その 5 損傷量進展過程の分析，日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東)，2011.8
- 9) 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
- 10) Kent D. C.，Park R.: Flexural members with confined concrete, Journal of Structural Division, ASCE, 97:ST7, pp.1969-1990, 1971
- 11) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの構成則と非線形解析，技報堂出版，1991.5
- 12) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999.8
- 13) 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，pp.859-864，2009.7
- 14) 高橋典之，中埜良昭：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，日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.13，pp.1373-1378，2010.11