

論文 曲げ降伏先行型 RC 柱部材の損傷量に基づく修復性評価モデルの構築に関する基礎研究

五十嵐 さやか^{*1}・曹 炳玫^{*2}・前田 匡樹^{*3}

要旨：RC 建築物における修復性評価では、部材に生じる損傷量を定量的に評価することが重要である。本報では RC 建築物の修復性評価モデル構築を目的に、損傷量としてひび割れ長さ及びひび割れ幅に着目し、骨組解析で用いられる材端バネモデルの変形に対応したひび割れ長さ及び各ひび割れ幅のひび割れ長さ割合の分布をモデル化することで、RC 部材に生じるひび割れ量を解析的に推定可能にする方法を検討した。モデル構築の第一段階として曲げ降伏先行型の RC 柱部材を対象としたひび割れ損傷量の分析とモデル化を試みた。

キーワード：修復性, 損傷評価, ひび割れ長さ, ひび割れ幅, 曲げ柱

1. はじめに

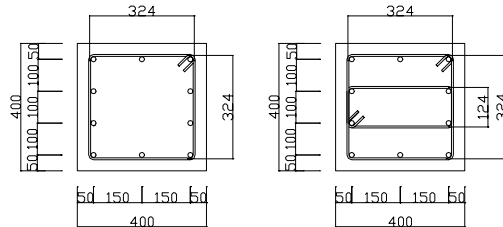
近年における耐震設計法の性能規定化に伴い、建築物が持つ耐震性能を適切に評価することが望まれている。建築物に必要とされる耐震性能¹⁾のうち「安全性」は、地震時の人命保護の観点から最も重要視されるべき性能であり、現在、被災後の建物の安全性を評価する方法の一つとして、部材に生じた損傷量（最大残留ひび割れ幅等）より建築物の安全性を評価する被災度区分判定²⁾が広く行われている。一方、近年の地震被害では、倒壊は免れるものの構造躯体の損傷が激しく、その修復費用が極めて高額になる場合や、建物の機能が損なわれる事例が多数生じており、建物の新築設計段階での耐震性能評価や被災建物については「安全性」のみならず、地震被災後の建物の復旧可能性や機能継続性を表現した「修復性」についても適切に評価可能であることが望ましいと考えられる。以上の背景より、本研究は損傷量として部材に生じたひび割れ長さ及びひび割れ幅の損傷量に基づいた「修復性」評価法の確立を目的としている。本報では、過去の実験結果を用いて損傷量の詳細分析を行い、「修復性」評価法構築の第 1 段階として曲げ柱のひび割れ幅の分布やひび割れ長さの推移についてモデル化を行った結果を示す。

2. 既往の実験データ分析概要

2.1 試験体概要

損傷量分析対象とする実験は、RC 造建物の 1 階中柱を想定した柱部材の正負交番静的加力実験³⁾である。試験体一覧を表 - 1 に、柱断面を図 - 1 に示す。試験体は計 3 体で、全て曲げ降伏がせん断破壊より先行する。実験因子は横補強筋比 p_w であり、各試験体は p_w の違いにより終局塑性率 μ_{max} に違いがある。スケールは実大の 2/3

程度で、断面寸法は 400mm×400mm である。加力は部材角で±0.25%を 1 サイクル、±0.5%、0.1%、±1.5%、±2.0%、±3.0%、±4.0%を各 2 サイクル行った。



(a) S2-1, S2-2 (b) S2-4

図 - 1 試験体断面 (単位 mm)

表 - 1 試験体一覧

	B×D(mm)	L(mm)	主筋	p_t (%)	横補強筋	p_w (%)
S2-1	400 ×400	1600	10-D16	0.50	2-D6@160	0.10
S2-2				0.50	2-D6@80	0.20
S2-4				0.50	4-D6@80	0.40

B×D：幅×せい(mm) L：内法スパン(mm)
 p_t ：引張鉄筋比(%) p_w ：横補強筋比(%)

2.2 ひび割れ計測方法

本実験では、加力の各サイクルのピーク時及び除荷時に試験体に生じたひび割れ幅及びひび割れ長さの計測を行っている。ひび割れ幅の計測はクラックスケールを用いて目視により行い、ひび割れを曲げひび割れとせん断ひび割れに分類した。曲げひび割れ幅は最外縁の幅を、せん断ひび割れ幅はそのひび割れの最大幅を計測している。曲げひび割れとせん断ひび割れの分類方法は、最外縁から 50mm (主筋のかぶり程度) の範囲に生じたひび割れを曲げひび割れ、それより内側の範囲に生じ、かつある程度斜めのひび割れと見なせるものをせん断ひび割れとしている。ひび割れ長さは、ひび割れ図を CAD 上に起こし、長さ測定ツールを用いて算出した。図 - 2

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 大学院生 (正会員)

*2 宮城工業高等専門学校 専攻科 建築・情報デザイン学専攻 (非会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 工学博士 (正会員)

にひび割れ分類方法の概要図を示す。

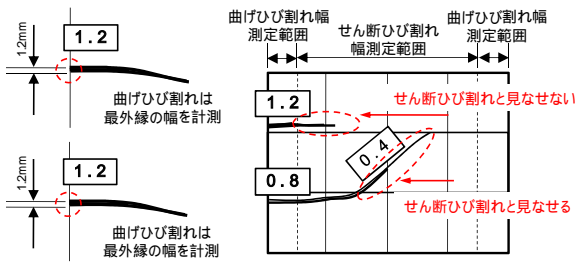


図 - 2 ひび割れ幅分類方法

2.3 損傷量分析結果

(1) 最大経験変形角と総ひび割れ長さの推移

図 - 3 に実験で得られた各試験体の荷重 - 変形関係と各最大経験部材角 R における総ひび割れ長さ L の推移とひび割れ幅の構成割合を示す。ここで最大経験部材角 R は、正負交番荷重における正側及び負側部材角の絶対値であり、総ひび割れ長さ L は、絶対値が等しい正負の各部材角において柱の表面全体に発生したひび割れ長さの合計である。ひび割れ幅は最大経験部材角後の除荷時の残留ひび割れ幅を値としている。

試験体の破壊形式は全て曲げ降伏（部材角約 0.6%）後のせん断破壊であり、横補強筋比 p_w が大きい試験体ほど終局塑性率も大きくなっている。図 - 3 右側の各最大経験部材角 R における総ひび割れ長さ L の推移については、全試験体、最大経験部材角 1% 付近で $L=20\text{m}$ 前後で頭打ちとなる傾向が見られる。最大経験部材角 R が大きい範囲では、ひび割れ長さが減少する場合があるが、これはコンクリートの剥落部分に含まれるひび割れ長さを含んでいないためである。また、ひび割れ幅の構成割合については、主筋が降伏し始める部材角 0.5% 程度以前は幅 0.2mm 未満のひび割れが大部分を占め、それ以降は塑性率の増加に伴い、幅 0.2mm 以上のひび割れが増加することが判る。また部材の降伏後、部材角 1% 程度まではひび割れ長さが増加するが、それ以降は新しいひび割れは発生せずに、それまでに生じたひび割れの幅が拡大する傾向があることが判る。

尚、試験体 3 体は横補強筋比 p_w が変数であるが、実験で得られたひび割れ図からは p_w の影響が明確に認められないため、本報では p_w の異なる試験体 3 体のひび割れ性状に差はないと仮定し、以降分析とモデル化を行った。

(2) 曲げひび割れとせん断ひび割れの長さの推移

図 - 4、図 5 に分類した曲げひび割れとせん断ひび割れについて、最大経験部材角 R と長さとの関係を示す。

曲げひび割れ長さの推移は、傾向の違いから以下の 3 区間でだまかに区分できると考えられる。

区間 A：曲げ降伏以前（ $R=0\sim$ 約 0.5%，弾性範囲）

区間 B：曲げ降伏し、ひび割れ長さが増加する範囲

（ $R=$ 約 0.5～1%，塑性率 $\mu=1\sim 2$ 程度）

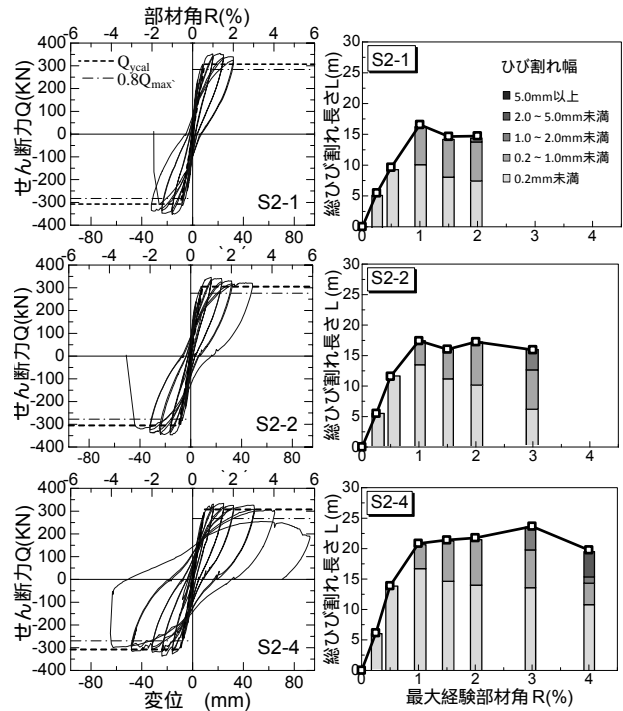


図 - 3 荷重 変形関係とひび割れ長さの推移

区間 C：ひび割れ長さ一定範囲

（ $R=1\sim$ 終局変形角，塑性率 $\mu=2\sim\mu_{max}$ ）

弾性領域である区間 A では、部材角に比例して曲げひび割れ長さが増加し、曲げ降伏直後の区間 B では、新たにひび割れが発生する一方でそれまでに生じたひび割れの幅も増加するので、ひび割れ長さの進展度合は区間 A より緩やかになる。 $\mu=2$ 以降は、新たなひび割れは発生せずに、それまでに生じたひび割れの幅が増大する傾向がある。また、せん断ひび割れについても、概ね塑性率 $\mu=2$ を境にひび割れの進展傾向が区分できる。

区間 a：せん断ひび割れ長さが増加する範囲

（ $R=0\sim 1\%$ ，塑性率 $\mu=2$ 以前）

区間 b：せん断ひび割れ長さ一定範囲

（ $R=1\sim$ 終局変形角，塑性率 $\mu=2$ 以降）

曲げひび割れが増加する区間 a では、せん断ひび割れ長さも部材角に比例して増加する。塑性率 $\mu=2$ 以降の区間 b では、新たなひび割れの発生は少なくなり、ひび割れ長さがほぼ頭打ちとなる傾向がある。

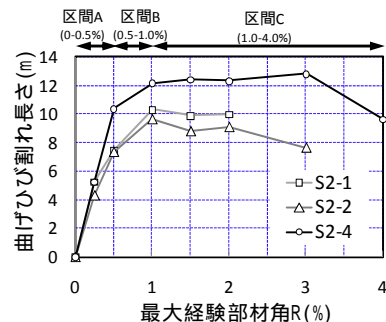


図 - 4 最大経験部材角 曲げひび割れ長さの推移

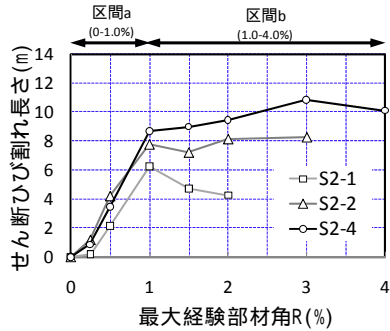


図 - 5 最大経験部材角 せん断ひび割れ長さの推移

(3)危険断面位置からのひび割れ幅分布

曲げ降伏先行型の柱部材では、部材端の主筋降伏により降伏ヒンジが生じ、そこにひび割れが集中すると考えられる。柱部材に生じるヒンジ領域が危険断面からどの程度離れた位置まで及んでいるかを図 - 6 のひび割れ幅の分布で示す。ひび割れ幅分布は試験体 3 体において、危険断面からの距離を 100mm 間隔で区分し、各区間に生じた柱頭・柱脚の曲げひび割れ幅の平均値とした。プロットは各区間の代表値である。各区分ピーク時、除荷時共に部材角が増加するに従ひひび割れ幅の絶対値も増加するが、ひび割れ幅が 0 に収束するのは、ピーク時で危険断面から 500mm 前後、除荷時で 400mm 前後となっていることから、本研究においては、ヒンジ領域は危険断面から柱せい D の位置程度に生じると仮定する。

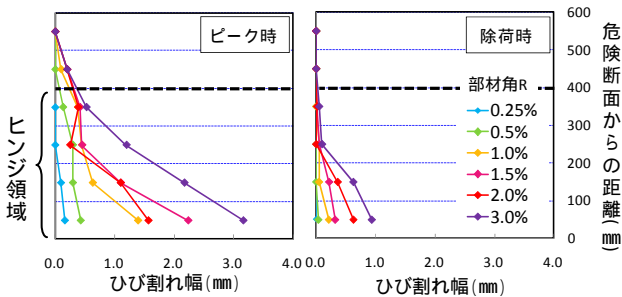


図 - 6 ひび割れ幅分布

3. ひび割れ量評価モデル構築

3.1 ひび割れ量評価の方針と流れ

本研究では、部材の修復性評価を行うにあたり、部材を、せん断バネと両端剛塑性の曲げ回転バネを有する線材に置換し、各バネモデルの復元力特性と対応したひび割れ長さの推移をモデル化することとした。これにより構造設計の実務で一般的な骨組モデルの荷重増分解析に適用することを念頭に、解析で算出される各バネの変形から、部材に生じるひび割れ量を算出することで、「修復性」評価が可能になる。

具体的には、曲げバネの回転角 θ_f とヒンジ領域に生じる曲げひび割れ長さ L_f の関係、及びせん断バネの変形 δ_s とヒンジ領域に生じるせん断ひび割れ長さ L_s の関係を定式化することで (図 - 7)、荷重増分解析で算出される

各部材の最大経験部材角 R に対して部材に生じる総ひび割れ長さ L を決定する。さらに、あるひび割れ幅区分に属するひび割れ長さが総ひび割れ長さに対して占める割合が求まれば (図 - 8)、部材の最大経験部材角 R における総ひび割れ長さと各ひび割れ幅のひび割れ長さが求まり、ひび割れ幅ごとの修復費用の単価より、部材全体の修復費用が算出可能となる。

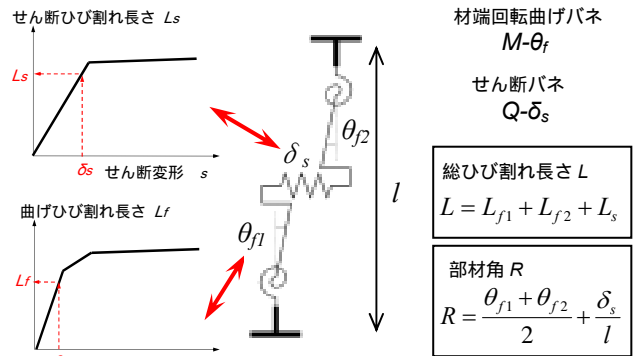


図 - 7 総ひび割れ長さの算出方法の概念図

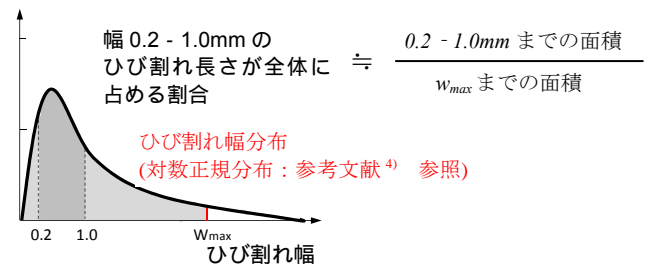


図 - 8 各ひび割れ幅区分の長さの割合の算出方法

3.2 曲げ回転角 θ_f 曲げひび割れ長さのモデル化

(1)曲げ回転角 θ_f 曲げひび割れ長さの傾向

図 - 9 に実験結果から算出した曲げ回転角 θ_f とヒンジ領域に生じる曲げひび割れ長さ L_f の推移を示す。 L_f は柱頭又は柱脚 1 か所の曲げバネと対応させるため、図 - 4 の長さの 1/2 としている。曲げ回転角 θ_f は、最大経験部材角 R から求めた曲げ変形角 R_f とした。曲げ変形角 R_f とせん断変形角 R_s の分離方法は部材角 R に占める曲げ変形角 R_f の割合 α に従って設定しており、 α は文献³⁾を参考に、曲げ降伏点までを $\alpha=0.9$ とし、曲げ降伏点以降は塑性率に比例して α を低減させ、せん断破壊時 (終局塑性率に達した点) を $\alpha=0.5$ とした。

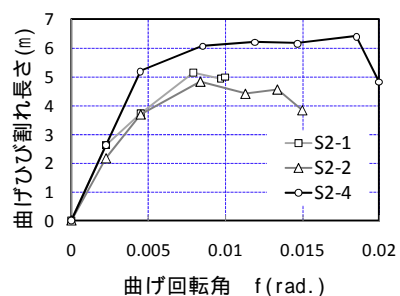


図 - 9 曲げ回転角 θ_f - 曲げひび割れ長さの推移

(2)曲げひび割れ長さ L_f のモデル化の方針

図 10 に曲げひび割れの概念図を示す。矩形断面柱に生じる曲げひび割れ長さ L_f は、部材のヒンジ領域に生じる曲げひび割れの本数 N_f と部材の断面寸法に大きく影響されると考えられる。これより曲げひび割れ長さ L_f のモデルは、曲げひび割れ本数 N_f と柱せい D 、柱幅 B を用いて (1)式で表わされると仮定し、以降の考察を行う。

$$L_f = 2\{N_f(B + 2\beta D)\} \quad (1)$$

L_f : ヒンジ領域に生じる曲げひび割れ長さ
 N_f : ヒンジ領域に生じる曲げひび割れ本数
 β : 曲げひび割れの進展度合を表す補正係数
 B : 柱幅 D : 柱せい

補正係数 β は、曲げひび割れ長さ 1 本あたりの長さの進展程度を示しており、柱せい方向面に生じた曲げひび割れ長さを柱せい D で基準化するための係数である。

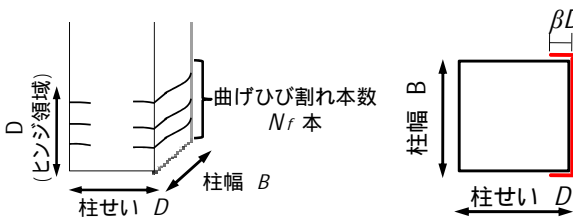


図 - 10 曲げひび割れ概念図

(3)曲げひび割れの本数 N_f のモデル化

図 - 12 に実験結果より各最大経験部材角 R と曲げひび割れ本数 N_f の推移を、図 - 11 に S2-2 試験体の各変形角のひび割れ図を示す。曲げひび割れ本数 N_f の算出にあたり、実際の曲げひび割れは何本ものひび割れが重なって生じているが、ここでは、柱幅方向面 2 面に生じた総ひび割れ長さの平均値を柱幅 B で除して柱幅方向面 1 面に生じる「見かけ」の曲げひび割れ本数を算出し、さらに柱頭・柱脚の各ヒンジに分離するため 1/2 を乗じたものを曲げひび割れ本数 N_f とする。この結果、区間 A では N_f は比例的に増加し、区間 B, C に移行するに従って N_f の増加割合は小さくなること判る。区間 C における N_f の微小な減少はコンクリート剥落部分のひび割れが含まれていないことが原因と考えられる。図 - 12 には各区間の平均ひび割れ本数がプロットしているが、概ね実際のひび割れ本数を表現できていると考えられる。

これより、モデル曲線は原点を通り、第 1 折点、第 2 折点を実験値よりそれぞれ $(R, N_f) = (0.5, 3.5)$, $(1.0, 4.7)$ とし、 $R = 1.0(\%)$ 以降は $N_f = 4.7$ の一定値として曲げひび割れ本数 N_f のモデル化を行った。 N_f のモデル曲線を図 13 に示す。

(4)曲げひび割れ 1 本あたりの長さ L_f と β のモデル化

各最大経験部材角 R のヒンジ領域に生じた曲げひび割れ長さを 3.2(3)の曲げひび割れ本数 N_f の実験値で除し、曲げひび割れ 1 本あたりのひび割れ長さの傾向を見ると、図 14 に示すように R に関わらずほぼ一定になること

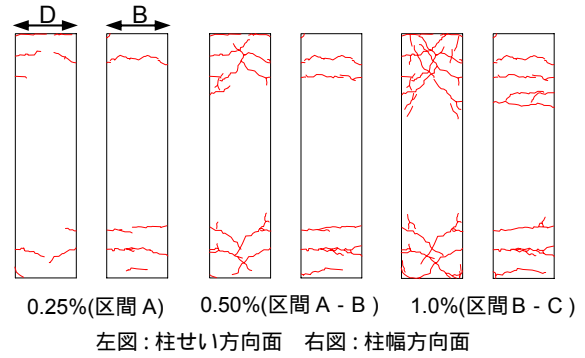


図 - 11 ひび割れ図 (S2-2 試験体)

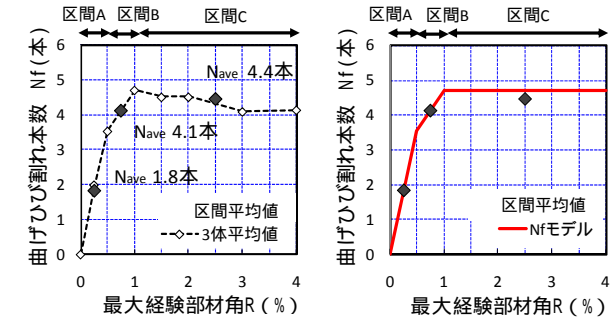


図 - 12 N_f の推移

図 - 13 N_f のモデル化

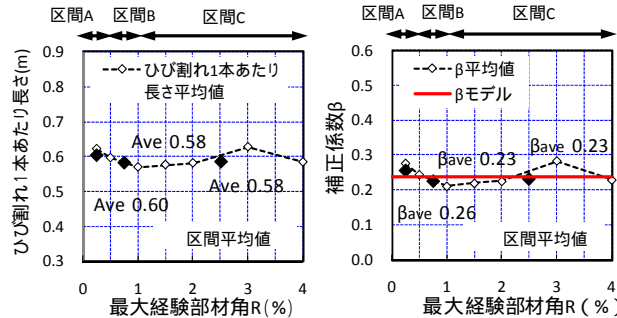


図 - 14 曲げひび割れ 1 本あたり長さの推移

図 - 15 β の推移とモデル化 (右図)

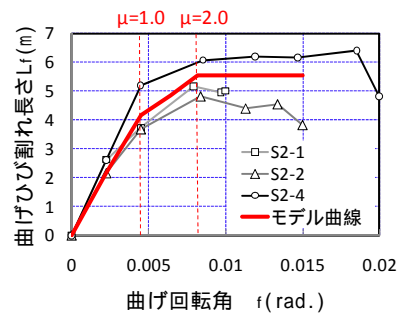


図 - 16 曲げ回転角 θ_f - 曲げひび割れ長さモデル

が判る。また曲げひび割れ 1 本あたりのひび割れ長さは $B + 2\beta D$ で表わされるため、補正係数 β も R に関わらずほぼ一定値をとる。これより、補正係数 β のモデルは図 15 に示すように $\beta = 0.24$ の一定値とすることとする。

(5)曲げひび割れ長さモデルの推定

上記で検討した N_f 及び β のモデルと (1) 式を用いて、曲げ回転角 θ_f - 曲げひび割れ長さ L_f のモデル化を行った。図 - 16 に L_f のモデル曲線と実験値をプロットしたグラフを示す。モデル化にあたり、曲げ変形の割合 α 、つま

り降伏時部材角 R_y と終局塑性率 μ_{max} が曲げ回転角 θ_f に影響してくるが、今回は降伏時部材角 $R_y=0.5(\%)$ 、終局塑性率 $\mu_{max}=6$ と仮定してモデル化を行った。

3.3 せん断変形 δ_s 、せん断ひび割れ長さのモデル化

(1)せん断変形 δ_s 、せん断ひび割れ長さの傾向

図 - 17 に実験結果を用いて算出したせん断変形 δ_s と柱頭・柱脚両ヒンジ領域に生じるせん断ひび割れ長さ L_s の推移を示す。せん断変形割合は $1-\alpha$ とした。

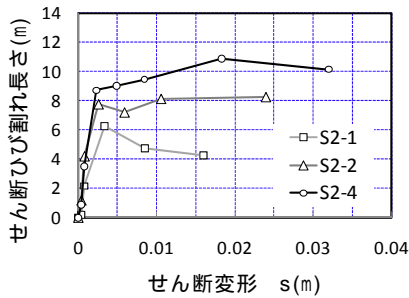


図 - 17 せん断変形 δ_s - せん断ひび割れ長さの推移

(2)せん断ひび割れ長さ L_s のモデル化の方針

曲げひび割れ長さと同様にせん断ひび割れ長さ L_s も、部材に生じたせん断ひび割れの本数 N_s と部材の断面寸法に大きく影響されることが考えられる。さらにせん断ひび割れが水平となす角度 θ も L_s に影響してくることが考えられる。このことからモデル化の際に、せん断ひび割れ長さ L_s はせん断ひび割れ本数 N_s と柱せい D と基準角度を $\theta=45^\circ$ を考慮し、(2)式で表わされると仮定した。

$$L_s = 2 \left\{ 4(N_s \cdot \gamma \sqrt{2}D) \right\} \quad (2)$$

L_s : 部材上下ヒンジ領域に生じるせん断ひび割れ長さ
 N_s : ヒンジ領域に生じる1方向のせん断ひび割れ本数
 γ : せん断ひび割れの進展度合を表す補正係数

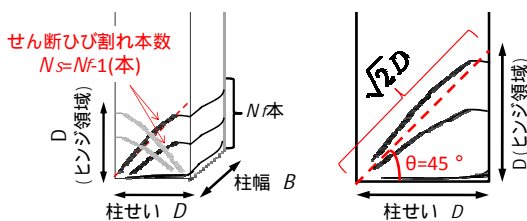


図 - 18 せん断ひび割れ概念図

(3)せん断ひび割れの本数 N_s のモデル化

曲げ降伏先行型の試験体は曲げひび割れが先に生じ、その曲げひび割れ箇所からせん断ひび割れが進展していくと考えられるので、せん断ひび割れの本数は曲げひび割れ本数に影響を受けると考えられる。ここで、ヒンジ領域に生じる斜め一定方向のせん断ひび割れ本数を N_s とすると、危険断面付近に生じるひび割れは曲げひび割れとみなせることから N_s は曲げひび割れ本数 N_f から1本分を差し引いたものと考え、以下せん断ひび割れ長さのモデル化では、 $N_s = N_f - 1$ が成り立つものとする。ただし、これは $N_f \geq 1$ の場合に成り立つこととし、 $N_f < 1$ の場

合にはせん断ひび割れは生じないこととする。

(4)せん断ひび割れ1本当たりの長さ γ のモデル化

各最大経験部材角について、ヒンジ領域に生じた斜め一定方向のせん断ひび割れ長さの合計をせん断ひび割れ本数 $N_s (=N_f-1)$ で除して算出したせん断ひび割れ1本当たりの長さをせん断ひび割れ角度 $\theta=45^\circ$ を想定した長さ $\sqrt{2}D$ で基準化して算出した補正係数 γ の推移を図 - 20 に示す。 γ は部材角が増加するに従い増加しているが、これはせん断ひび割れ1本の長さが部材角の増加に伴い増加することを表している。今回は実験結果から γ のモデルは原点を通り、 $(R, \gamma)=(1.0, 0.45)$ を第1折点、区間bの平均値 $(R, \gamma)=(2.5, 0.50)$ を通るモデルとした。

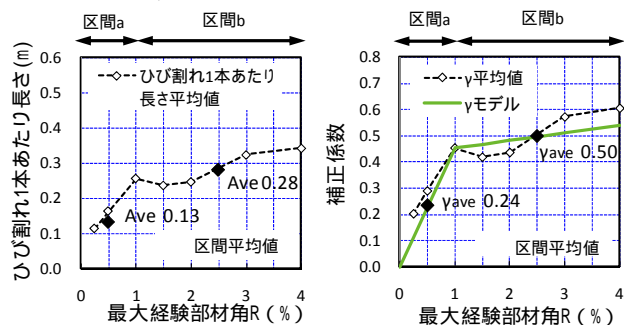


図 - 19 せん断ひび割れ1本あたり長さの推移 図 - 20 γ の推移とモデル化

(5)せん断ひび割れ長さモデルの推定

上記で検討した係数 N_s と γ のモデルと(2)式を用いて、せん断変形 δ_s —せん断ひび割れ長さ L_s のモデル化を行った結果を図 - 21 に示す。モデル曲線はせん断ひび割れ長さの増加傾向は概ね捉えているものの、モデル化の際に、実験変数である p_w の影響を無視し、平均値を用いて分析を行っているため、第2折点以降は実験値とモデル曲線の差が顕著に表れる結果となり、 p_w がひび割れ長さに与える影響は今後検討すべき課題である。

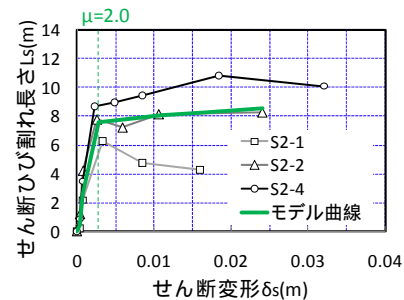


図 - 21 せん断変形 δ_s - せん断ひび割れ長さモデル

3.4 ひび割れ幅分布のモデル化

(1)ひび割れ幅の分布の傾向の把握

高橋・中埜の研究⁴⁾では、あるひび割れ幅区分とそのひび割れ幅区分に含まれるひび割れ長さが総ひび割れ長さに占める比率が対数正規分布に従うという条件で、ひび割れ幅別に長さ比率を推定する方法を検討してい

これを参考に、実験結果について各ひび割れ幅区分（0.2mm 未満、0.2~1.0mm 未満、1.0~2.0mm 未満、2.0~3.0mm 未満、3.0~4.0mm 未満、4.0~5.0mm 未満、5.0mm 以上）に含まれるひび割れ長さから頻度分布を作成し、その標本平均 μ と標準偏差 σ 、変動係数 v を求めた。ひび割れ幅を上記のように区分したのは、文献³⁾で被災度区分判定基準²⁾に合わせて、上記の区分で整理されたデータを用いたためである。平均 μ と変動係数 v の結果を図-22に示す。平均値 μ は最大経験部材角 R の増加に伴い値が増加している。変動係数 v は幅 0.2mm 未満のひび割れのみ生じる弾性範囲以降でばらつきが生じ、塑性率 $\mu=4(R=2\%)$ までは 0.9 前後となるが、それ以降はさらに値が増加し、さらにばらつきが増加することが判る。

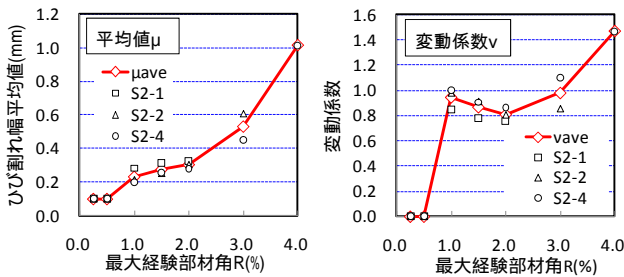


図-22 μ, v の推移

(2)ひび割れ幅分布の傾向

3.4(1)で算出したひび割れ幅平均値 μ 、標準偏差 σ より、各部材角 R についてひび割れ幅分布を対数正規分布で表わすことができる。平均値 μ や標準偏差 σ は部材角 R の変化に伴い刻々と変化するのでひび割れ幅分布形も変化していく。分布の傾向を大まかに把握するために図

23に区間B, Cにおけるひび割れ幅分布モデルを示す。区間BからCを比較すると、塑性率が増加するとひび割れ幅が増加する方向に分布がばらついていく傾向が判る。区間Aはひび割れ幅が全て0.2mm 未満となるので分布形は存在しない。

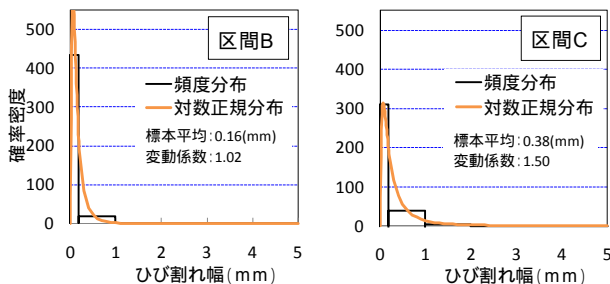


図-23 ひび割れ幅分布

4.ひび割れモデルの検証

モデル曲線が、実験結果を再現しているかどうかを確認するために、総ひび割れ長さ L 及び各ひび割れ幅の割合について、実験値と計算値の比較を行った。

計算値は、総ひび割れ長さ L については以下に示す(3)式で求めた。ひび割れ割合は、正確には分布の面積の全

体に対するひび割れ区分における面積の割合であるが、実際に部材に生じるひび割れ幅には最大ひび割れ幅 w_{max} が存在するため、 w_{max} までの面積が総ひび割れ長さに該当すると仮定して以下(4)式で算出することとした。

$$L = 2L_f + L_s \tag{3}$$

$$\frac{\text{幅 } w_1 \sim w_2(\text{mm}) \text{ のひび割れ長さが総ひび割れ長さに占める割合}}{\text{幅 } w_1 \sim w_2 \text{ における分布の面積}} = \frac{\text{最大ひび割れ幅 } w_{max} \text{ 以下の分布の面積}}{\text{最大ひび割れ幅 } w_{max} \text{ 以下の分布の面積}} \tag{4}$$

図-24に実験値(S2-2)とモデル化の結果得られた計算値を示す。計算値について、総ひび割れ長さ L の増加は19m付近でほぼ頭打ちとなっており、概ね実験値の傾向を捉えていると考えられる。ひび割れ幅の割合については、部材角の増加による各ひび割れ幅区分の割合の増減は表現できているが、例えば部材角2%で実験値では0.2mm 未満の割合が0.2~1.0mm 未満の割合より大きいのにに対し、計算値では逆転しており、1つの部材角で見ると各ひび割れ区分の比率はまだ十分に表現しきれていない部分もある。ひび割れ幅分布形については、今後さらに検討が必要と考えられる。これらのひび割れ量の評価により修復費用の推定が可能となると考えられるが、それについては紙面の制約上、別稿で今後検討を進めていく予定である。

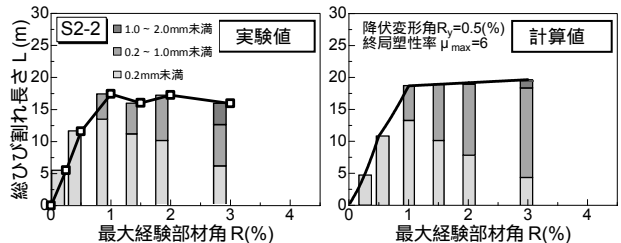


図-24 ひび割れ長さ割合の実験値と計算値の比較

5. 結論

損傷量としてひび割れ長さとしひび割れ幅に着目した修復性評価方法の方針を示した。また実験結果より材端バネモデルに対応した曲げひび割れ長さ、せん断ひび割れ長さの推移とひび割れ幅分布をモデル化した。今後は横補強筋比 p_w がひび割れ量に及ぼす影響を踏まえたモデル化の検討も行っていく予定である。

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，2004.7
- 2) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針
- 3) 田中康介，康大彦，前田匡樹ほか：震災鉄筋コンクリート造建築物の残存耐震性能評価法，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17, No.5, pp.87-95, 2003.5
- 4) 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報告集，Vol.30.No.3,pp1027-1032, 2008.7