

論文 RC 柱部材の幾何学的変形状態に基づく簡易ひび割れ幅推定における変動軸力の影響

塚 大祐*1・高橋 典之*2

要旨：耐震性能評価の広範な普及を促進すべく、一般的な耐震設計に用いられる比較的簡易な構造解析技術に適用可能な幾何学的変形状態に基づくひび割れ発生モデルの活用を念頭に、想定されるひび割れ量が修復費用の積算に直結するよう、ひび割れ幅とひび割れ長さの関係を示す「ひび割れ幅分布特性」のモデル化について研究を進めてきた。本論文では、変動軸力を受ける柱試験体を検討対象として得られた「ひび割れ幅分布特性」を通して、従来提案されてきた幾何学的変形状態に基づく簡易ひび割れ幅推定モデルの適否について分析し、変動軸力による影響を踏まえた簡易ひび割れ幅推定モデルの拡張を検討した。

キーワード：柱部材, 変動軸力, 損傷量評価, 幾何学的変形状態

1. はじめに

地球環境保全および省資源化を目的として建物を長期使用・維持管理する必要性が高まっている。建物の長期使用を促進するためには供用期間中に発生する地震に対する修復性能を適切に評価し、維持管理を継続するほうが解体・新設するよりも建築主にとって経済合理性を有することを示す必要がある。これまで、修復性能評価を目的として補修費用の積算に直結する地震損傷量推定に関する研究が進められてきた^{1),2)}。具体的には、RC 造建物の構造躯体を対象に、ひび割れ幅・ひび割れ長さの相関関係（以降、「ひび割れ幅分布特性」）についての評価方法を検討してきた。ひび割れ幅分布特性は、既往の研究^{3),4)}より一般に対数正規分布に従うことが分かっている。すなわち、対数正規分布を規定する2変数（平均ひび割れ幅と対数標準偏差）が分かれば、RC 部材のひび割れ幅分布特性を定めることができる。既往の研究⁴⁾より、構造部材種別（梁、柱、壁）および部材角に応じてひび割れ幅分布特性を定める2変数が変化することが指摘されているが、2変数の変化を実験結果に頼らず部材設計条件のみから特定するモデルの確立には至っていない。2変数を特定するモデル確立に向けて実験で撮影された損傷画像データの分析を進めるにあたり、筆者らは⁵⁾深層学習を用いた損傷検出手法と損傷量計測アルゴリズム⁶⁾を併用することで RC 部材のひび割れ幅分布特性を定量化する省力化技術を提案してきた。

一方、日本建築学会「鉄筋コンクリート造の耐震性能評価指針（案）・同解説」⁷⁾では、RC 部材の幾何学的条件から部材角とひび割れ幅との関係をモデル化しており、このモデルの妥当性や改良に関する研究^{1),8)}が進められてきた。本論文では、深層学習と損傷量計測アルゴリズムを用いたひび割れの定量化技術によってひび割れ幅

分布特性を計測し、その計測データに基づいて、従来提案されてきた幾何学的変形状態に基づく簡易ひび割れ幅推定モデルの適否について分析し、変動軸力による影響を踏まえた簡易ひび割れ幅推定モデルの拡張を検討した。なお、ひび割れ幅分布特性を定める変数である対数標準偏差について、既往の研究^{1),3)}では損傷観測結果から統計的に推定し、部材角ごとの傾向やばらつきが大きさが指摘されているところであるが、本論文では統計上有意な軸力条件数を確保していないことから検討対象外とした。

2. 検討対象および計測結果

本論文では、既往の実験⁹⁾で撮影した、変動軸力を受ける RC 造柱試験体と一定軸力の RC 造柱試験体を対象とした。対象試験体形状および配筋図を図-1 に、試験体諸元を表-1 にそれぞれ示す。文献⁹⁾では、超高層 RC 造建物の地震時挙動で見られる下層柱の大きな軸力変動に対応できる柱部材 Multi-Spring モデルの構築を目標として、柱軸力を一定とするケースと水平荷重の大きさに比例して柱軸力を変動させるケースの2つのケースで静的加力実験を実施しており、水平挙動のみならず軸挙動についても詳細に計測しているが、紙面の都合上、実験結果詳細については文献⁹⁾を参照されたい。

検討対象試験体に対して、筆者らによる過去の検討⁵⁾で提案した深層学習を用いた損傷検出手法と損傷量計測アルゴリズムを併用するひび割れ幅分布特性の計測手法を適用し、各部材角時の平均ひび割れ幅を算定した。なお紙面の都合上、損傷量計測アルゴリズムの詳細については文献^{5), 6)}を参照されたい。平均ひび割れ幅の推移を図-2(a)に示す。なお、変動軸力を受ける柱試験体では、圧縮時と引張時でひび割れ性状が異なると考えられ、圧縮時と引張時それぞれのひび割れ量を計測している。また、耐震性能評価指針（案）⁷⁾の部材角-ひび割れ関係

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (学生会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博(工) (正会員)

モデルは、変形成分（曲げ・せん断）ごとにそれぞれ曲げひび割れ幅の合計値、せん断ひび割れ幅の合計値が関連付けられるモデルである。本論文では、図-3 に従いひび割れを分類し、ひび割れの種類ごとにひび割れ量を計測した。ひび割れ角度に基づくひび割れ分類は文献 10) を参考に設定し、特に曲げせん断ひび割れは文献 11) で曲げ回転を伴う進展を示すひび割れであると確認されているため、曲げ変形成分に寄与するものとした。ひび割れの種類ごとの平均ひび割れ幅の推移を図-2(a)~(d)に示す。なお本論文では、各部材角状態（ピーク時はピーク時部材角、除荷時は除荷時部材角）について、例えばピーク時においては「平均ひび割れ幅」は「部材角ピーク時のひび割れ幅の平均値」、「最大ひび割れ幅」は「部材角ピーク時のひび割れ幅の最大値」として定義した。

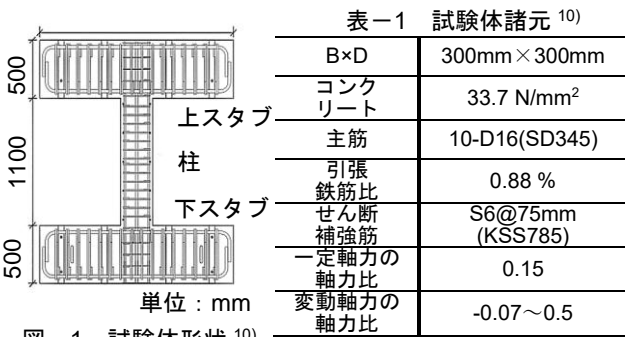


図-1 試験体形状¹⁰⁾

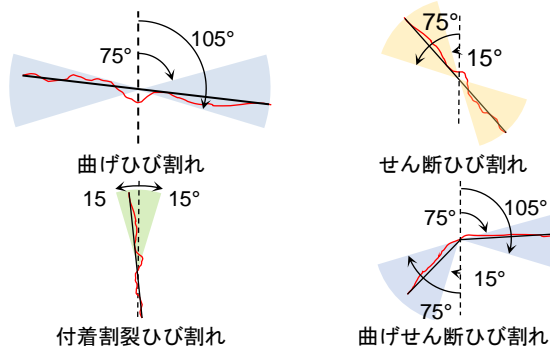


図-3 ひび割れの分類

3. 曲げひび割れ幅推定

曲げひび割れを部材端部の危険断面に集約させ、曲げひび割れ幅合計値に応じて（中立軸を中心に）剛体回転して生じる回転角と、部材の曲げ変形角が等しいとする幾何学的変形状態に基づきひび割れ幅を推定する方法（図-4）は、文献 7)をはじめこれまでも多数検討されて

きた。しかし、高い変動軸力を受ける柱試験体に対する適否は検証されておらず、本論文ではこれを検証する。まず、式 (1) に基づき平均曲げひび割れ幅を算出する。

$$w_{f,ave} = \alpha_f \cdot \frac{R_f(D - x_n)}{n_f} \quad (1)$$

ここに、 $w_{f,ave}$ ：平均曲げひび割れ幅、 R_f ：部材角の曲げ変形成分、 α_f ：平均ひび割れ幅／最大ひび割れ幅の比、 D ：部材せい、 x_n ：圧縮縁から中立軸までの位置、 n_f ：等価曲げひび割れ本数である。なお、等価曲げひび割れ本数 n_f は耐震性能評価指針（案）⁷⁾に従い2本を仮定しているが、指針のただし書きにあるように、限られた試験体に基づいて設定された値であることに注意が必要である。また、圧縮軸力を受ける場合、部材の降伏前ではモーメント勾配の釣り合いから、降伏後は圧縮側コンクリートがストレスブロックに近似できるとして x_n を算定し、引張軸力を受ける場合は、全面引張と仮定して $x_n = 0$ としている。

平均ひび割れ幅の算出において、式 (1) に必要なパラメータ（曲げ変形成分、平均ひび割れ幅／最大ひび割れ幅の比など）は、本研究の目的と照らし合わせると、簡易な構造解析技術で運用可能な情報であることが望ましく、例えば精密解析をしないと得られないような非線形領域を含みかつばらつきを内包する実測データをそのまま式 (1) に適用しても妥当性の検証にはならない。そこで、部材角に占める曲げ変形成分の割合、平均ひび割れ幅／最大ひび割れ幅の比について、簡易なモデルを定めた。まず、一定軸力を受ける柱試験体、変動軸力を受ける柱試験体の圧縮側、変動軸力を受ける柱試験体の引張側における各部材角の変形成分の分布を図-5~7に示す。一定軸力を受ける柱試験体では全変形角を通して安定的に変形成分を計測できている、変動軸力を受ける柱試験体では1/100radまでは安定的に変形成分を計測できていた。本論文では、安定的に得られている変形成分比から各成分の比の平均値を回帰モデル（図-5~7中の回帰モデル）として定め、式 (1) のパラメータに用いることとした。回帰モデルは、曲げ、端部の回転、せん断の実測成分比の平均値を用いており比の合計値は1.0にならないが、後述する軸伸びや割裂のように上記3成分以外が部材の幾何変形に影響する可能性を考慮し、比の合計値は1.0にスケールせずそのままの値を用いることと

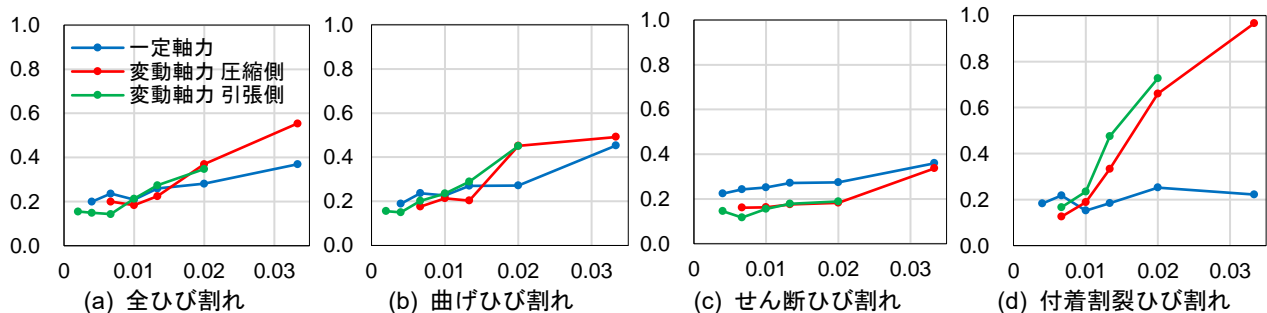


図-2 平均ひび割れ幅の推移（縦軸：平均ひび割れ幅 [mm]、横軸：部材角 [rad.]）

した。なお、一定軸力を受ける柱試験体、変動軸力を受ける柱試験体の引張側では、弾性理論に基づく曲げ剛性およびせん断剛性から計算される変形成分比と回帰モデルでの変形成分比はほぼ同じ割合を示しており、変動軸力を受ける柱試験体の圧縮側では、ややせん断成分が大きい割合である。

平均ひび割れ幅/最大ひび割れ幅の比は、一定軸力を受ける柱の曲げひび割れ・せん断ひび割れ、変動軸力圧縮側載荷時の柱の曲げひび割れ・せん断ひび割れ、変動軸力引張側載荷時の柱のせん断ひび割れのそれぞれについて、実験結果を式(2)に示す形式の回帰モデルで算出し、これを用いることにした。一方、変動軸力引張側載荷時の曲げひび割れについては、平均ひび割れ幅/最大ひび割れ幅の比が図-8(濃い緑線)のように他と異なる傾向を示した。これは、材軸に沿ってモーメントが変化する曲げひび割れに、材軸に沿って同じ引張軸力が作用し生じる純引張ひび割れが合わさって、最大ひび割れ幅とその他のひび割れ幅との差が小さくなったためと考えられる。もともと図-4のモデルは曲げひび割れ+純引張ひび割れの複合状態を考慮した幾何学モデルではないため、図-8の濃い緑線から回帰式を算出しても図-4で想定しているモデルには適用できない。そこで変動軸力引張側載荷時の曲げひび割れについては、全体変形に占める曲げ成分から純引張成分を分離して、幾何モデルを通して曲げ成分-ひび割れ関係を評価すべく、式(2)のパラメータ β 、 γ に文献10)で提示された値を採用した。

$$\alpha_f = \beta \cdot IDR^{-\gamma} \quad (2)$$

ここに、 β 、 γ ：正の定数、 IDR ：層間変形角(本論文では部材角)である。

図-9~11に平均曲げひび割れ幅の解析値と計測値の比較を記す。いずれの試験体においても、解析値は計測値と概ね適合しており、変動軸力を受ける柱試験体においても、幾何学的変形状態に基づく簡易曲げひび割れ推定手法が適用できると考えられる。

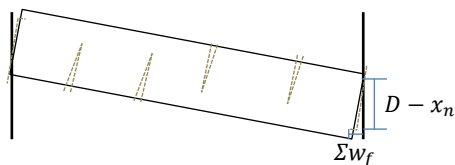


図-4 曲げひび割れと曲げ変形の幾何モデル⁷⁾

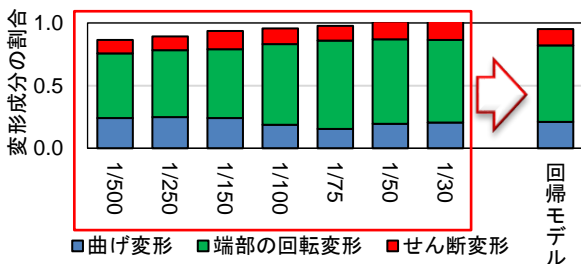


図-5 一定軸力試験体の変形成分推移

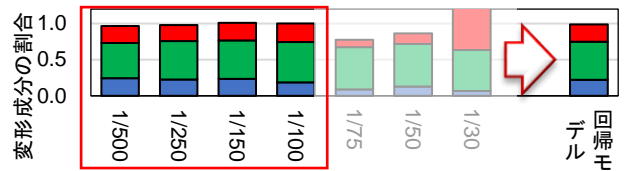


図-6 変動軸力試験体(圧縮側)の変形成分推移

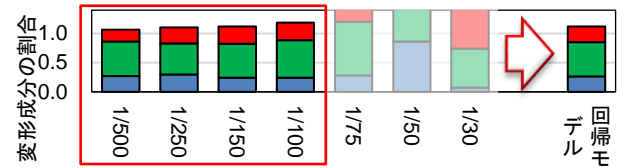


図-7 変動軸力試験体(引張側)の変形成分推移

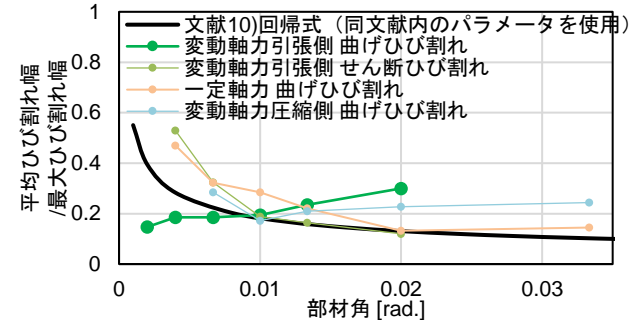


図-8 平均ひび割れ幅/最大ひび割れ幅の比

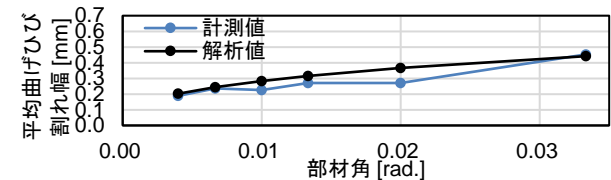


図-9 一定軸力試験体の解析結果

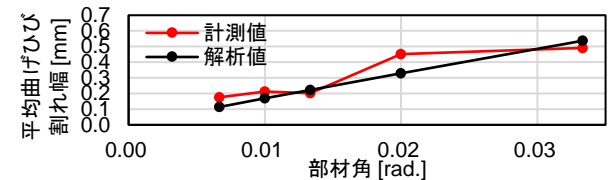


図-10 変動軸力試験体(圧縮側)の解析結果

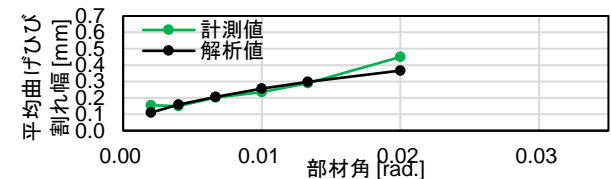


図-11 変動軸力試験体(引張側)の解析結果

4. せん断ひび割れ幅推定

4.1 せん断ひび割れの進展角度および本数の仮定

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」¹²⁾に記されているトラス機構が材軸となす角度 $\cot \alpha$ の制限値(式(3))を用いて、塑性ヒンジ領域の長さとしひび割れ進展角度を定めた。平均せん断ひび割れ間隔 S_{ave} は、過去の検討で実験結果と比較的良好な対応が見られる¹³⁾CEB-FIP Model Code 1978¹⁴⁾の推定式(式(4))を採用した。図-12に等価せん断ひび割れ本数としひび割れ進展角度の概念図を示す。図の赤線より材端側に「曲げせん断ひび割れ」が生じ、青線が「純

せん断ひび割れ」となる。前述のように、曲げせん断ひび割れは、曲げ変形成分に寄与するものとしているため、ここで等価せん断ひび割れ本数には含まない。

$$\cot \alpha \leq \sqrt{\frac{\lambda v_0 \sigma_B}{p_{we} \sigma_{wy}} - 1} \quad (3)$$

$$S_{ave} = 2(c + 0.1s) + \kappa_1 \kappa_2 \frac{\phi}{\rho_e} \quad (4)$$

ここに、 λ ：トラス機構の有効係数、 v_0 ：コンクリート圧縮強度の有効係数、 σ_B ：コンクリートの圧縮強度、 p_{we} ：有効せん断補強筋比、 σ_{wy} ：せん断補強筋の信頼強度、 c ：かぶり厚さ、 s ：鉄筋中心間距離、 $\kappa_1 = f_{ct}/f_{bm}$ (f_{ct} ：コンクリートの引張強度、 f_{bm} ：鉄筋の付着応力)、 κ_2 ：ストレイン・ダイアグラムの形状係数、 ϕ ：主筋の直径、 ρ_e 有効鉄筋比である。

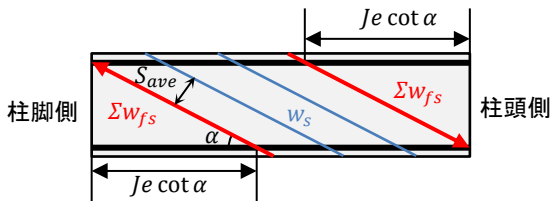


図-12 せん断ひび割れ進展角度および本数の仮定

4.2 せん断ひび割れ幅の推定

せん断ひび割れを集約させ、せん断ひび割れ幅合計値に応じてせん断変形成分が計算できるものと仮定した幾何学的変形状態に基づき平均せん断ひび割れ幅を推定する手法(図-13)は、3章の曲げひび割れ幅に対するのと同様、これまででも多数検討されてきたが、高い変動軸力を受ける柱試験体に対する適否については検証されてこなかったため、本論文ではこれを検証する。

せん断変形成分比、平均ひび割れ幅/最大ひび割れ幅の比は、図-5~8に基づき回帰モデルを定め、これを用いて式(5)より平均せん断ひび割れ幅を算定した。なお式(5)は、せん断ひび割れがひび割れ進展方向に対し直交する方向に拡幅すると仮定した算定式である。図-14~16に解析値と計測値の比較を記す。

$$w_{sh,ave} = \alpha_{sh} \cdot \frac{\delta_{sh}}{n_{sh} \cos \theta_{cr}} \quad (5)$$

ここに、 $w_{sh,ave}$ ：平均せん断ひび割れ幅、 α_{sh} ：平均ひび割れ幅/最大ひび割れ幅、 δ_{sh} ：変位のせん断成分、 n_{sh} ：等価せん断ひび割れ本数(2本)、 θ_{cr} ：ひび割れ角度である。なお、ひび割れ角度 θ_{cr} は、 $\cot \alpha$ から導出される制限値(式(3))を用いている。また、ひび割れ角度 θ_{cr} の設定値は、実測値とも概ね適合していた。

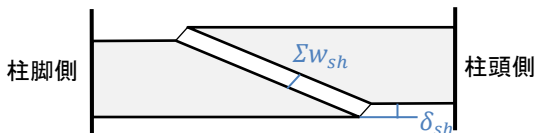


図-13 せん断変形とせん断ひび割れの幾何モデル⁷⁾

図-14から、一定軸力を受ける柱試験体においては、精度良くひび割れ幅を推定できることを確認した。

図-15から、変動軸力を受ける柱試験体の圧縮側載荷時においては、いずれの部材角でも推定値が計測値を過大評価する傾向にあった。付着割裂ひび割れによる変形がせん断変形成分を肩代わりした可能性が考えられる。

図-16から、変動軸力を受ける柱試験体の引張側載荷時においては、いずれの部材角でも推定値が計測値を過大評価する傾向にあった。引張軸力により、圧縮側載荷時のせん断ひび割れが開いた状態で残留し部材表面に現れたため(図-17)、ひび割れ本数が多くなり、計測値の平均ひび割れ幅が小さくなったと考えられる。そこで、正負両載荷のせん断ひび割れをともに考慮した図-18の幾何学的変形モデルを提案する。部材角せん断成分と軸伸びによる付加部材角が等しく、軸伸びによる付加部材角は端部回転変形分として表されるものとして、せん断ひび割れによる軸伸び δ_{ax} が $\delta_{ax} = \delta_{sh}(h/D)$ (h ：部材長)で求まるものとし、引張時のせん断ひび割れ長さ $w_{sh,ave}$ と残留ひび割れ長さが同じだと仮定すると、変動軸力を受ける柱試験体の引張側載荷時のせん断ひび割れ幅 $w_{sh,ave}$ は、式(6)~(8)で算出できる。推定結果と計測値の比較を図-19に示す。正負両載荷のせん断ひび割れをともに考慮することで、ひび割れ幅の推定精度が向上した。すなわち、引張軸力を受ける部材では圧縮側載荷時のせん断ひび割れが開いたままになりやすいことを考慮することで精度良くひび割れ幅が推定できるようになる。

$$w_{sh,ave} = \alpha_{sh} \cdot \frac{w_{t,sh} + w_{c,sh}}{2} \quad (6)$$

$$\delta_{sh} = n_{sh} w_{t,sh} \cos \theta_{cr} \quad (7)$$

$$\delta_{ax} = R_{sh} D = n_{sh} w_{c,sh} + n_{sh} w_{t,sh} \sin \theta_{cr} \quad (8)$$

ここに、 R_{sh} ：部材角のせん断変形成分、 δ_{sh} ：せん断変位の水平成分、 $w_{t,sh}$ ：引張時の最大せん断ひび割れ幅、 δ_{ax} ：せん断変形に伴う鉛直方向の伸び、 $w_{c,sh}$ ：圧縮側載荷時に発生したせん断ひび割れの引張側載荷時での幅の最大値、 D ：部材せいである。

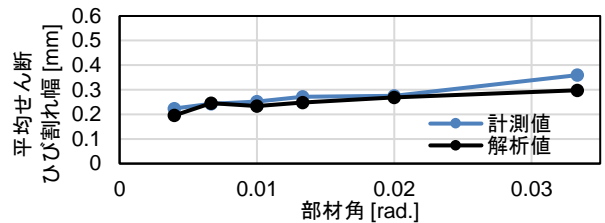


図-14 一定軸力試験体の解析結果

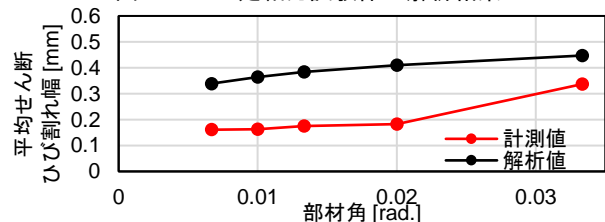


図-15 変動軸力試験体(圧縮側)の解析結果

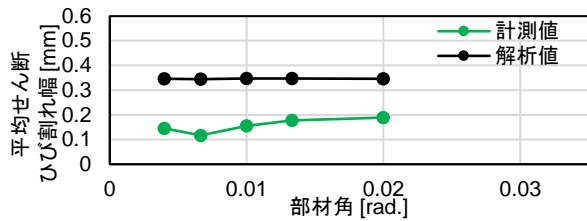


図-16 変動軸力試験体（引張側）の解析結果

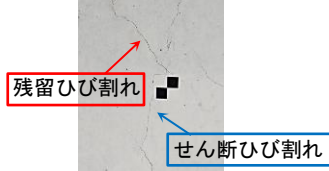


図-17 変動軸力引張時の残留ひび割れ

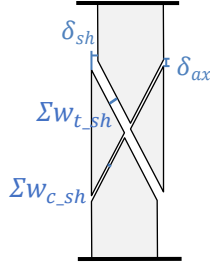


図-18 正負両载荷を考慮したせん断ひび割れモデル

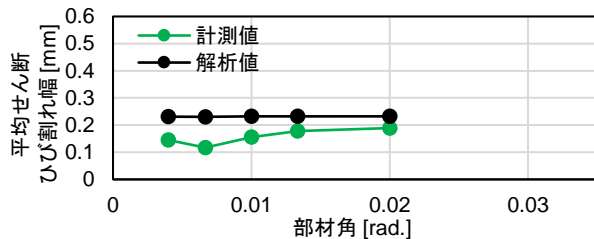


図-19 変動軸力試験体（引張側）の解析結果
（正負両载荷考慮）

なお、図-19中の $\Sigma W_{t,sh}$ 、 $\Sigma W_{c,sh}$ は合計せん断ひび割れ幅を示し、 $\Sigma W_{t,sh} = n_{sh}W_{t,sh}$ 、 $\Sigma W_{c,sh} = n_{sh}W_{c,sh}$ である。

4.3 割裂ひび割れを考慮したせん断ひび割れ幅の推定

変動軸力を受ける柱試験体で平均せん断ひび割れ幅の推定値が計測値を過大評価していたこと、変動軸力を受ける柱試験体では付着割裂ひび割れが卓越していたことから、せん断変形成分 δ_{sh} の一部を付着割裂ひび割れが負担していた可能性を考え、図-20の幾何学的変形モデルを新たに考案した。図-20の幾何学的変形モデルに基づき平均せん断ひび割れ幅の算出式を導出すると式(9)が得られる。引張側载荷時は、式(9)の付着割裂ひび割れ幅の負担分を除いた状態に式(6)を重ねて適用することで平均ひび割れ幅を算出する。なお、式(9)は引張軸力が作用するなど付着割裂ひび割れが卓越することによる付加変形がせん断ひび割れ成分の一部を負担していると考えられる場合に用いる式である。ここで、式(9)の付着割裂ひび割れによる変形量 δ_{sp} を定めるモデルを検討すべく、平均せん断ひび割れ幅の実測値と推定値が整合するように、式(9)からせん断変位 δ_{sh} に占める付着割裂ひび割れによる変形量 δ_{sp} の割合を算出した結果を

図-21に示す。図-21より、付着割裂ひび割れによる変形量がせん断変形量の半分ほどを示していた。あわせて、付着割裂ひび割れによる変形量 δ_{sp} が式(10)に示すように「割裂ひび割れ係数 λ_{sp} 」を用いて平均付着割裂ひび割れ幅から求められるとした場合の割裂ひび割れ係数 λ_{sp} を図-22に示す。付着割裂ひび割れ係数 λ_{sp} は部材角増大に伴い減少する傾向にあり、分散していた付着割裂ひび割れが部材角増大で繋がったことを示している。

$$w_{sh,ave} = \alpha_{sh} \cdot \frac{\delta_{sh} - \delta_{sp}}{n_{sh} \cos \theta_{cr}} \quad (9)$$

$$\delta_{sp} = \lambda_{sp} w_{sp} \quad (10)$$

ここに、 δ_{sp} ：付着割裂ひび割れによる変形量、 w_{sp} ：平均付着割裂ひび割れ幅、 λ_{sp} ：付着割裂ひび割れ係数。

付着割裂ひび割れによる変形がせん断変形成分の半分を占めている（残りはせん断ひび割れによる変形）と仮定して平均ひび割れ幅を算定した結果を図-23、24に示す。付着割裂ひび割れが卓越した柱試験体において、せん断変形成分 δ_{sh} の半分を付着割裂ひび割れが負担していた（ $\delta_{sp} = \delta_{sh}/2$ ）と考えると精度良くひび割れ幅を推定できることが分かった。なお、更なるデータ収集を通して、付着割裂ひび割れによる変形量 δ_{sp} 、割裂ひび割れ係数 λ_{sp} を精緻に定めるモデルを構築できれば、付着割裂ひび割れが卓越した試験体においても適切なひび割れ幅推定が可能になると考えられる。

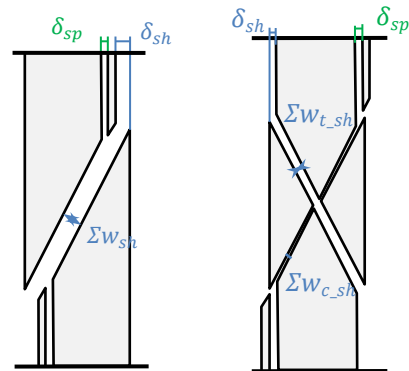


図-20 付着割裂ひび割れを考慮したモデル

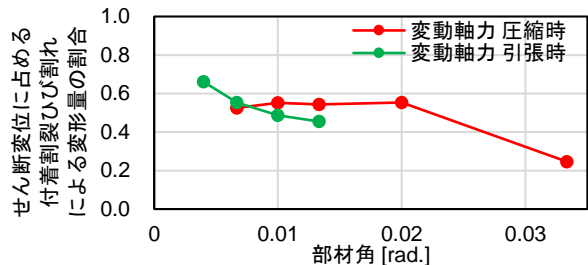


図-21 付着割裂ひび割れのせん断変位寄与割合

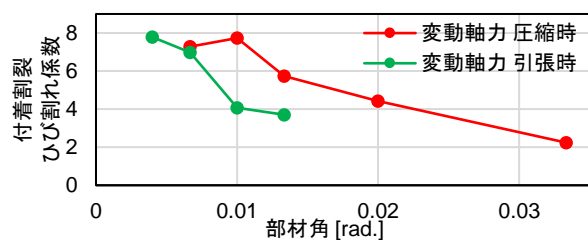


図-22 付着割裂ひび割れ係数

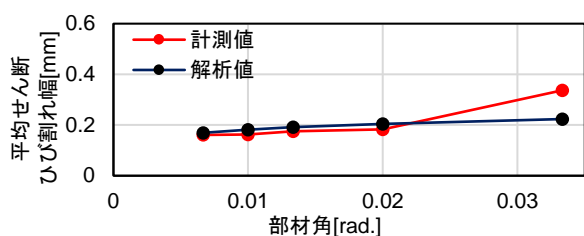


図-23 変動軸力試験体（圧縮側）せん断ひび割れ幅

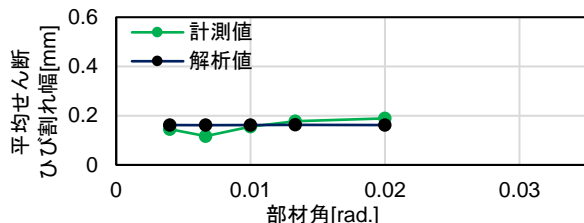


図-24 変動軸力試験体（引張側）せん断ひび割れ幅

5. まとめ

変動軸力を受ける柱試験体を検討対象として、ひび割れ幅分布特性の計測データに基づいて、従来提案されてきた幾何学的変形状態に基づく簡易ひび割れ幅推定モデルの適否について分析し、変動軸力による影響を踏まえた簡易ひび割れ幅推定モデルの拡張を検討した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 幾何学的変形状態に基づく簡易ひび割れ幅推定モデルを、一定軸力を受ける柱試験体、変動軸力を受ける柱試験体それぞれの曲げひび割れ幅評価に適用した。その結果、両試験体で平均曲げひび割れ幅を比較的精度良く推定できることを確認した。
- 2) 幾何学的変形状態に基づく簡易ひび割れ幅推定モデルを、一定軸力を受ける柱試験体、変動軸力を受ける柱試験体それぞれのせん断ひび割れ幅評価に適用した。一定軸力を受ける柱試験体では平均ひび割れ幅を精度よく推定できたが、変動軸力を受ける柱試験体では、推定値が過大評価する傾向にあった。このことについて、引張軸力を受ける部材では圧縮載荷時のせん断ひび割れが開いたまま残るモデルを仮定することで精度良く平均せん断ひび割れ幅を推定できることが分かった。また、付着割裂ひび割れがせん断変形量の一部を負担したと考えると付着割裂ひび割れを考慮した新たな幾何学的変形モデルを検討したところ、せん断変形成分の半分を付着割裂ひび割れが負担したと仮定することで精度良く平均せん断ひび割れ幅を推定できることが分かった。

謝辞

本研究は、科学研究費 挑戦的研究(開拓) (課題番号: 23K17331, 研究代表者: 高橋典之) の助成を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) Takahashi, N. and Nakano, Y.: Seismic Repair Cost of R/C Structures Using a Geometrical Damage Estimation Model, Proc. of the First International Conference on Computational Design in Engineering, pp.515-518, Nov. 2009
- 3) 滝本和志ほか: 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
- 4) Takahashi, N. et al.: 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, Paper No.237, Jul. 2010
- 5) 塚大祐ほか: 深層学習を用いた RC 部材のひび割れ幅分布特性評価と分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.2, pp.217-222, 2023.7
- 6) 王一哲ほか: 画像解析による RC 部材のひび割れ幅分布特性の計測に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp.673-678, 2020.7
- 7) 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, 2004.1
- 8) 杉大地ほか: 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
- 9) 川野菜々美ほか: 軸力変動を受ける RC 柱部材実験と柱軸挙動に着目した Multi-Spring モデルに関する検討, 日本建築学会東北支部研究報告集(構造系), 第 86 号, pp.21-24, 2023
- 10) 日本コンクリート工学会: ひび割れ進展評価手法委員会報告書, 2013.7
- 11) 伊藤洋一ほか: 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), C-2, pp.813-814, 東京, 2011.8
- 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
- 13) キム キョンミンほか: 鉄筋コンクリート柱のひび割れ発生機構に基づくひび割れ量の予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1579-pp.1584, 2006
- 14) CEB-FIP: Model Code for Concrete Structure, Apr.1978.