

論文 RC 壁部材のひび割れの幾何学性状および進展機構に基づく簡易的な損傷量推定手法に関する研究

塚 大祐*1・高橋 典之*2

要旨: 地震による建物の損傷補修費用の積算を目的として、ひび割れ幅とひび割れ長さの組み合わせ量を表す「ひび割れ幅分布特性」についての研究が進められている。特に、設計時に修復性能評価の一環として補修費用を評価する際には、通常の構造解析にも適用可能な損傷量推定モデルの一部としての「ひび割れ幅分布特性」を把握することが重要である。本研究では、鉄筋コンクリート壁部材のひび割れ幅分布特性を定める変数である対数標準偏差と平均ひび割れ幅をひび割れの幾何学的性状および進展機構に基づいて推定することで簡易的な損傷量推定手法を提案するとともに、その手法の精度を検証した。

キーワード: ひび割れ, 壁部材, 損傷量評価

1. はじめに

地球環境保全および省資源化を目的として、建物を長期に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ことのほうが解体・新設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。この観点で修復性能評価を実施することを目的として、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、鉄筋コンクリート(以下、RC)造建物の構造躯体を対象に、ひび割れ幅-ひび割れ長さ関係(特定のひび割れ幅を有するひび割れ長さがどれだけの割合あるか)についての定量的な評価が検討されてきた。その一例を図-1に示す。ひび割れ幅-ひび割れ長さ関係(以降、ひび割れ幅分布特性と呼ぶ)は、既往の研究³⁾より一般に対数正規分布に従うことが分かっている。これを用いることで、対数正規分布を定める変数(中央値にあたる平均ひび割れ幅と、分布のばらつきを表す対数標準偏差)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ようになる。ひび割れ幅分布特性を特定することができれば、これをもって簡易な損傷量推定モデルおよび修復費用評価モデル(図-2)を展開し、修復性能評価を容易に実施できる基盤技術を提供できる。なお、図-2の面積に対し、ひび割れの補修方法ごとに修復費用単価を乗じて修復費用を算出するこの考え方は、文献5)を参考に本論文でも採用するものである。

既往の研究⁴⁾で、構造部材種別(梁、柱、壁)および部材角によってひび割れ幅分布特性を定めるパラメータが変化することは示されているが、限られた試験体に対する分析であり、パラメータを特定するモデル化には至っていない。筆者らによる過去の検討⁶⁾で、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⁷⁾を併用することで、RC壁部材のひび割れ幅分布特性を定量評価する試みを報告している。そこで本研究では、RC壁部材を対象に、損傷量推定手法としてひび割れ幅分布特性を定める変数である平均ひび割れ幅と対数標準偏差をひび割れの幾何学的性状と進展機構からそれぞれ簡易的に推定するモデル化手法を提案する。

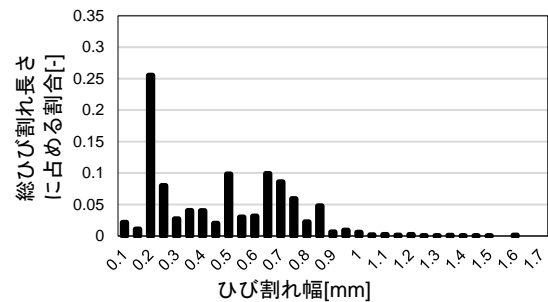


図-1 ひび割れ幅分布特性を表すグラフの例⁶⁾

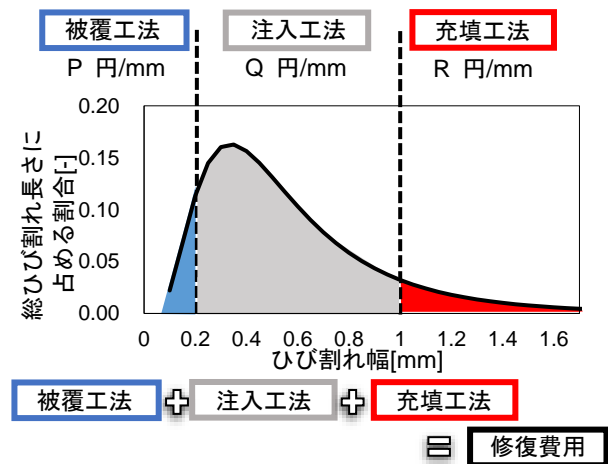


図-2 ひび割れ幅分布特性による損傷量推定モデルと修復費用評価のイメージ

*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)

2. 検討対象及び計測結果

計測した RC 壁試験体の形状および配筋図を図-3に、試験体諸元を表-1 にそれぞれ示す。対象試験体は乾燥収縮が壁部材の構造性能に及ぼす影響を検討するために養生条件が実験変数となっている。なお、紙面の都合上、実験結果の詳細については文献 8), 9)を参照されたい。

対象試験体の対数標準偏差と平均ひび割れ幅(中央値)の部材角ごとの推移をそれぞれ図-4、図-5に示す。これは、予備検討で検出精度を確保した深層学習モデルを作成し、これを用いて損傷領域(すなわち「ひび割れ領域」で、「ひび割れ幅」と「ひび割れ長さ」双方が含まれる情報)を計測するとともに、形態学的画像演算処理を利用した損傷量計測アルゴリズムを用いて RC 壁部材のひび割れ幅分布特性を算定している。検討対象とした RC 壁部材では、乾燥収縮によって生じた既発ひび割れに地震ひび割れが集約されやすくなり、乾燥収縮の少ない WM 試験体、乾燥収縮のある3ヵ月養生の WD2 試験体、乾燥収縮のある8ヵ月養生の WD1 試験体の順で、対数標準偏差が減少(ひび割れが集約)した。また部材角の増大とともに平均ひび割れ幅は増大傾向を示した。なお、紙面の都合上、深層学習モデル、損傷量計測手法および計測結果の詳細については文献 6), 7)を参照されたい。

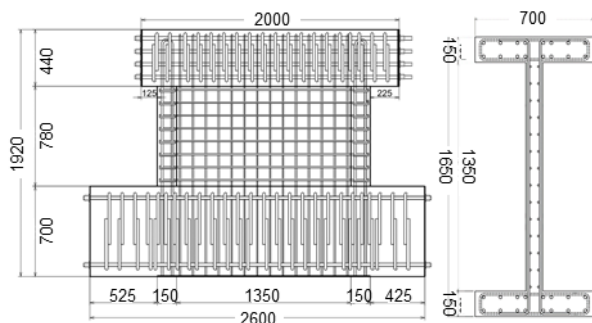


図-3 試験体形状・配筋図(単位: mm)

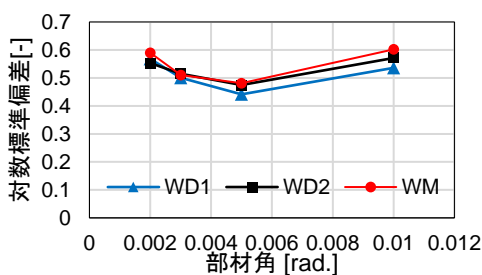


図-4 対数標準偏差の推移⁶⁾

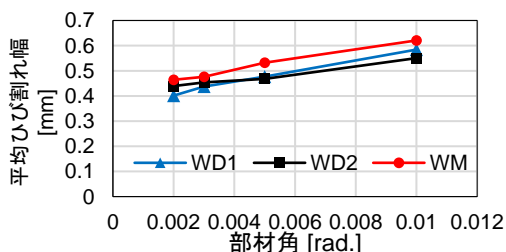


図-5 中央値(平均ひび割れ幅)の推移⁶⁾

表-1 試験体諸元

| 試験体 | WM 試験体 | WD2 試験体 | WD1 試験体 |
|---------------------------------|---------|---------------------------|---------|
| 内法高さ | 780mm | | |
| フランジ壁 | B×D | 700×150mm | |
| | 主筋 | 16-D16($p_f=2.8\%$) | |
| | 帯筋 | 2-D10@100($p_w=0.95\%$) | |
| ウェブ壁 | 壁厚 | 100mm | |
| | 全長 | 1650mm | |
| | 壁筋 | D10@100 ダブル(縦横) | |
| M/QD | 0.67 | | |
| N/BD σ_B | 0(軸力なし) | | |
| 養生方法 | シールド | 暴露(ウェブ壁表面のみ) | |
| 養生期間 | 3ヶ月 | | 8ヶ月 |
| σ_B (N/mm ²) | 35.5 | 34.3 | 38.7 |

3. 簡易的な損傷量推定手法の概要

3.1 ひび割れの幾何学的性状に基づいた平均ひび割れ幅の推定

3.1.1 平均ひび割れ幅の推定手法の概要

検討対象の試験体の曲げ剛性 K_f およびせん断剛性 K_s をそれぞれ式(1)、式(2)により算定したところ、 K_f は 9.64×10^6 [N/mm], K_s は 2.08×10^6 [N/mm]であった。試験体の載荷により弾性域を超えると曲げとせん断の変形成分比は剛性比とは異なるため上記はあくまで参考程度にしかならないが、曲げ剛性がせん断剛性と比べて高く、対象試験体ではせん断ひび割れのみが卓越したことから、本検討の平均ひび割れ幅算出において、曲げひび割れ幅については検討対象とせず、せん断ひび割れのみを考慮することにした。

$$K_f = 12E_c I / L^3 \quad (1)$$

$$K_s = GA / H \quad (2)$$

ここに、 E_c : コンクリートのヤング率[N/mm²], I : I型壁の断面二次モーメント[mm⁴], L : 壁の全長[mm], G : せん断弾性係数[N/mm²], A : ウェブ壁の断面積[mm²]でありフランジ壁芯間のウェブ壁厚部分がせん断力を負担するものとし本論文では100mm×1500mm, H : ウェブ壁の内法高さ[mm]である。

キムら¹⁰⁾は、RC造柱部材を対象としてひび割れとひび割れにより生じる部材変形との関係からひび割れ幅を算定している。また、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」¹¹⁾では、壁部材に対してせん断ひび割れ間隔と主引張方向ひずみ度からせん断ひび割れ幅を算定する手法(トラス剛性による手法)を提案している。本研究では、より簡便にひび割れ幅を算定すること(部材の諸元と変形角からひび割れ幅を算出すること)を目的として、図-6のように一定

間隔ごとに斜めのせん断ひび割れが生じるものと仮定し、キムらの手法¹⁰⁾を参考とした図-7の幾何モデルを用いて平均ひび割れ幅を算出した。その際、図-7aのようにせん断ひび割れの向きに対して直角方向にせん断変形した場合(ケース A)と図-7bのように部材水平方向にせん断変形した場合(ケース B)の2つのケースについて検討した。また、ひび割れ幅の算出にあたり次の5つの事項を仮定した。

- 1) ひび割れによって分割されたコンクリート部は剛体的挙動を示し、ひび割れ部のみで変形する。
- 2) 部材変形の曲げ成分とせん断成分は、式(3)に従い分配される。これは、弾性時にも部材の降伏後にも等しく適用されることとする。

$$R = \frac{K_s}{K_f + K_s} R_f + \frac{K_f}{K_f + K_s} R_s \quad (3)$$

ここに、 R ：部材角[rad.], R_f ：曲げひび割れによる変形角[rad.], R_s ：せん断ひび割れによる変形角[rad.]である。

- 3) せん断ひび割れは圧縮ストラッド上に生じた後、それに平行なひび割れが文献11)に示されている平均ひび割れ間隔算定式(式(4))に従って等間隔に生じるもの(図-6)と仮定する。

$$s^{l_{ave}} = \frac{3\sigma_t b_e t_w \{2.6 - 0.93 \log[0.5(S_x + S_y)]\}}{[n\tau_{max}(\Phi_x + \Phi_y)] \cos \theta_{cr}} R_s \quad (4)$$

ここに、 $s^{l_{ave}}$ ：水平方向の平均せん断ひび割れ間隔(図-6中の $s^{l_{ave}}$) [mm], σ_t ：コンクリートの引張強度[N/mm²], t_w ：壁厚[mm], τ_{max} ：鉄筋とコンクリートの付着強度[N/mm²], Φ_x, Φ_y ：横筋および縦筋の鉄筋周長[mm], n ：鉄筋段数, S_x, S_y ：横筋および縦筋の鉄筋間隔[mm], θ_{cr} ：ひび割れの角度[rad.](図-6中の θ_{cr})である。

- 4) ケース A(図-7a)では、剛体部がせん断ひび割れの向きに直交して変形するものと仮定する。したがって、せん断による変位は式(5)により導出される。

$$\delta_s = R_s H = \sum s^w \cos \theta_{cr} \quad (5)$$

ここに、 δ_s ：せん断による変位[mm], s^w ：せん断ひび割れ幅である。

- 5) ケース B(図-7b)に対して、剛体が部材水平方向にせん断変形する(純せん断が生じる)と仮定する。したがって、せん断による変位は式(6)により導出される。

$$\delta_s = R_s H = \sum \frac{s^w}{\cos \theta_{cr}} \quad (6)$$

ここに、式(7)により求まる m を部材端部のせん断ひび割れ本数(せん断変形を構成するひび割れの本数で図-6中の m)と定義し、以上の仮定を踏ま

えると、図-7の幾何学モデルのケース A およびケース Bにおける平均ひび割れ幅 $s^{w_{ave}}$ は、それぞれ式(8)、式(9)により求まる。

$$m = \frac{H}{s^{h_{ave}}} = \left\lfloor \frac{H \tan \theta_{cr}}{s^{l_{ave}}} \right\rfloor \quad (7)$$

$$s^{w_{ave}} = \frac{\sum s^w}{m} = \frac{K_f R H}{(K_f + K_s) m \cos \theta_{cr}} \quad (8)$$

$$s^{w_{ave}} = \frac{\sum s^w}{m} = \frac{K_f R H \cos \theta_{cr}}{(K_f + K_s) m} \quad (9)$$

ここに、 $s^{h_{ave}}$ ：鉛直方向の平均せん断ひび割れ間隔(図-6中の $s^{h_{ave}}$) [mm]である。

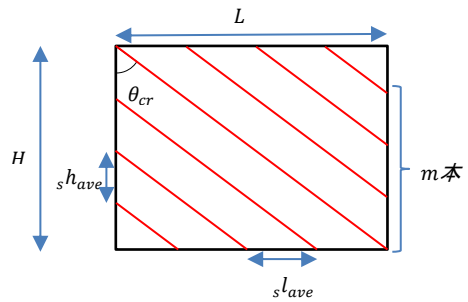
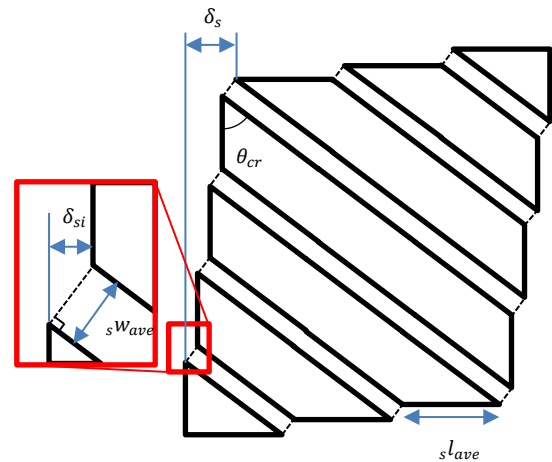
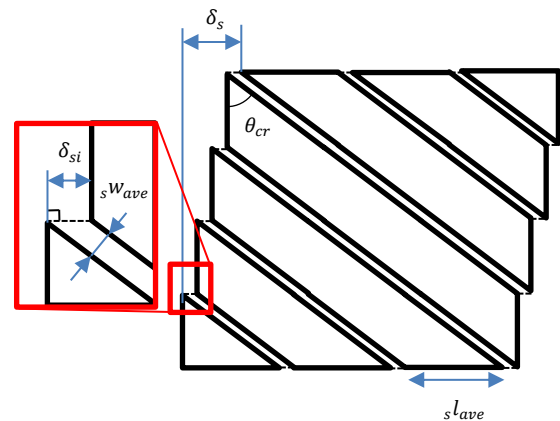


図-6 ひび割れ発生位置



a) せん断ひび割れの向きに対して直交方向に変位した場合(ケース A)



b) 部材水平方向にせん断変形した場合(ケース B)

図-7 せん断ひび割れと部材変形の関係

3.1.2 幾何モデルの適用結果

前章に示した RC 壁試験体に対し、ケース A およびケース B の幾何モデルを適用した。その結果を図-8、図-9 に示す。グラフ全体の概形としてケース B (剛体が部材水平方向にせん断変形した場合)の方が実験結果と近い値になる傾向があった。しかし、1/500 rad.時のみに注目するとケース A (せん断ひび割れの向きに対して直角方向に変位した場合)の方が実験値に近く、1/333 rad.時における両ケースの適合度は同程度であった。このことから、実際には、せん断ひび割れの向きに対して剛体の変位する角度がケース A とケース B の間(ひび割れの向きと剛体の変形方向の成す角度が $0^\circ \sim 90^\circ$ の間)にあったことが考えられる。せん断ひび割れの向きに対して剛体部が変位する角度を適切に設定できた場合、精緻

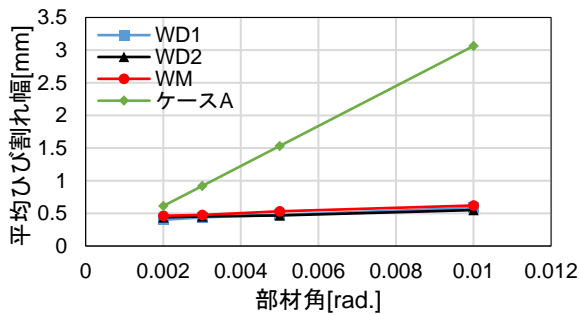


図-8 ケース A と計測値の比較

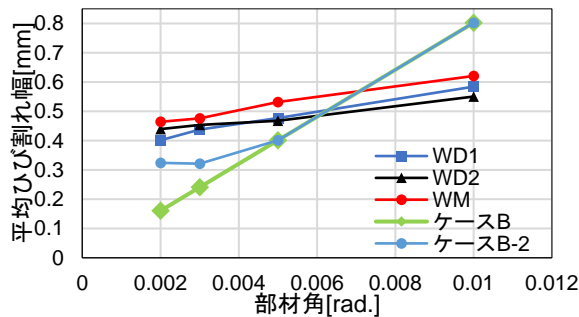


図-9 ケース B 及び B-2 と計測値の比較

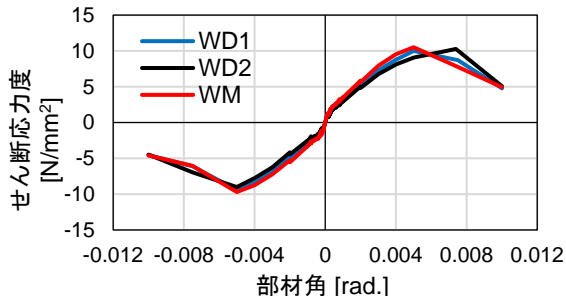


図-10 部材角-せん断応力度関係



図-11 ひび割れの分岐 (左: 写真, 右: 二値画像)

にモデル化できると考えられる。ただし、本検討の平均ひび割れ幅算出においてはせん断ひび割れのみを考慮していることから、ここでの精度検証において曲げひび割れや乾燥収縮ひび割れの影響は無視したものであることには注意されたい。

現実的なひび割れ挙動のモデル化を目的として、ケース B において、せん断ひび割れの発生からひび割れ定常状態に至るまでのひび割れ進展過程を考慮し、部材角の増大に伴ってひび割れ本数が増える場合(ケース B-2)について追加検討を行った。具体的には、式(7)で算出した対象試験体のせん断ひび割れ本数 m は 4 本であったが、1/500 rad.時では $m=2$ 、1/333 rad.時では $m=3$ 、1/200 rad.以降は $m=4$ としてひび割れ本数が増えることを想定したうえで、平均ひび割れ幅を推定した。これは、図-10の部材角-応力度関係より、1/333 rad.から 1/200 rad.の間で新たなひび割れ発生がなくなり応力が頭打ちとなりながら既発ひび割れが開いていくだけの状態になる「ひび割れ定常状態」に至ったものと想定して定めたひび割れ本数の仮定である。結果を図-9中に示す。ひび割れの発生からひび割れ定常状態に至るまでを模擬したケース B-2の方が、平均ひび割れ幅の推定値が実験結果により近くなることが確認できた。また、図-9の 1/200 rad.以降の実験と解析の差は、解析で用いた幾何学モデルでは「1本のひび割れ」として扱うひび割れについて、実計測ではひび割れ進展パスの途中で「細かい分岐(図-11)の発生」により、分割されたひび割れ幅を区分計測して平均値を求めたことで生じた差と考えられる。

3.2 ひび割れ進展機構に基づいた対数標準偏差の推定

筆者らによる過去の検討⁵⁾でも示しているように、図-4の 1/500 rad.~1/200 rad.の範囲より RC 壁部材において微小変形から小変形への移行時(鉄筋降伏前)はひび割れ定常状態に至るまでのひび割れ本数が増えていく過程においてほとんどのひび割れのひび割れ幅は小さいまま一部のひび割れのみが拡幅していること、図-4の 1/200 rad.~1/100 rad.の範囲より降伏後は各ひび割れが各々の応力レベルに応じてまちまちに広がる傾向にあることが分かる。そこで、3.1.2項と同様に、1/333 rad.から 1/200 rad.の間でひび割れ定常状態に至ったと仮定して、ひび割れ定常状態到達前(1/500 rad.時と 1/333 rad.時)と定常状態到達後(1/200 rad.時と 1/100 rad.時)の2つに分割して最小二乗法により式(10)に示す線形近似を行った。

$$\lambda(R) = \alpha R + \beta \quad (10)$$

ここに、 $\lambda(R)$: 部材角 R [rad.]における対数標準偏差、 α 、 β : 定数である。その結果、定常状態到達前では $(\alpha, \beta) = (-46.4, 0.663)$ 、定常状態到達後では $(\alpha, \beta) = (-20.9, 0.362)$ であった。また、二つの近似式は 1/223 rad.で交わ

っていた。これは、新たなひび割れ発生がなくなり応力が頭打ちとなりながら既発ひび割れが開いていくだけの状態になるところを「ひび割れ定常状態」に至ったものとする平均ひび割れ幅推定におけるケース B-2 の考え方と同様、ひび割れ幅分布特性における対数標準偏差についても「ひび割れ定常状態」の前後でその特性が変化するものとしたモデル化であると言える。図-12 に近似式に基づく直線と計測値プロットの比較を示す。

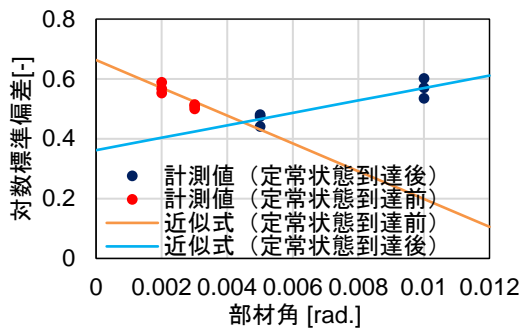


図-12 近似式と計測値の比較

4. 修復費用評価を目的とした考察

建物の長期使用を促進するために維持管理を継続することのほうが解体・新設よりも建築主にとって経済合理性を有することを示すことを目的とする場合、過度に細分化したひび割れ幅階級ごとのひび割れ長さ推定値と計測値の適合度に拘泥するよりも、修復費用における推定値と計測値の適合度の方が合理的な判断となることも考えられる。そこで、図-2 のように、総ひび割れ長さに占める各補修方法のひび割れ長さの割合を積算し、ケース B-2 において推定したひび割れ幅分布特性による修復費用と計測値から算出した修復費用を比較した。計測値の修復費用は式 (11) によって、推定したひび割れ幅分布特性による修復費用は式 (12) によって積算した。

$$Cost = (P_{cr}p_P + Q_{cr}p_Q + R_{cr}p_R)_{cr}l_{all} \quad (11)$$

$$Cost = \left\{ P \int_0^{0.2} f(w)dw + Q \int_{0.2}^{1.0} f(w)dw + R \int_{1.0}^{\infty} f(w)dw \right\}_{cr}l_{all} \quad (12)$$

$$f(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta w} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta} \right)^2 \right] \quad (13)$$

ここに、 $Cost$: 総修復費用 [円], P : 単位長さ当たりの被覆工法の修復費用 [円/mm], Q : 単位長さ当たりの注入工法の修復費用 [円/mm], R : 単位長さ当たりの充填工法の修復費用 [円/mm], $_{cr}p_P$: 総ひび割れ長さに対する被覆工法で修復するひび割れ長さの割合[-], $_{cr}p_Q$: 総ひび割れ長さに対する注入工法で修復するひび割れ長さの割合 [-], $_{cr}p_R$: 総ひび割れ長さに対する充填工法で修復するひび割れ長さの割合 [-], $_{cr}l_{all}$: 総ひび割れ長さ [mm],

ζ : 平均ひび割れ幅 [mm], λ : 対数標準偏差 [-], w : ひび割れ幅 [mm]である。

上記の式に基づき積算した結果を表-2 に示す。部材角ごとに注目すると、1/500 rad., 1/333 rad., 1/200 rad.時のそれぞれにおいて補修方法ごとの修復費用が総修復費用に占める割合（特に、被覆工法で修復するひび割れの修復費用比率と注入工法で修復するひび割れの修復費用比率）を比較的正確に推定できていたが、太めのひび割れ（充填工法で修復するひび割れの修復費用比率）を過大評価する傾向にあった。これは、ひび割れ幅分布特性が対数正規分布に従うものとして 0 に漸近するものの完全に 0 ではない確率を有する領域の補修費用を算定しているため、計測されていない太いひび割れを確率論的に算入していることが原因と考えられる。また、1/100 rad.時においては細めのひび割れ（被覆工法で修復するひび割れの修復費用比率）を過小評価し、太めのひび割れの修復費用比率を過大評価する傾向にあり、推定値と計測値に無視できない差が生じた。

ここで、試験体の養生方法の違いに注目すると、8 ヶ月暴露養生の WD1 試験体、3 か月暴露養生の WD2 試験体、3 か月シールド養生の WM 試験体の順で、本研究の推定結果は小さめのひび割れ（被覆工法で修復するひび割れの修復費用比率）を過小評価する傾向が見られた。本研究の推定手法は乾燥収縮の影響を見込む項目がないため WD1 試験体、WD2 試験体、WM 試験体いずれも同じ推定値となるが、実際には乾燥収縮により多くの初期ひび割れがあったため小さめのひび割れが推定より多く発生していたものと考えられる。今後、乾燥収縮の程度によるひび割れ性状への影響をパラメータ推定に取り入れることでより正確に補修費用を算定できる可能性があると考えられる。

表-2 補修方法ごとの本研究提案モデルに基づく推定値と実試験体に基づく計測値の比較

| | | 部材角 | 1/500 | 1/333 | 1/200 | 1/100 |
|----|----------|-------|-------|--------|---------|-------|
| 被覆 | 推定値 | | 20.3 | 18.3 | 6.75 | 0.736 |
| | 工法費用 [%] | WD1 | 36.0 | 21.7 | 13.5 | 11.6 |
| | | WD2 | 30.2 | 21.7 | 16.1 | 15.9 |
| | WM | 28.7 | 19.3 | 12.4 | 14.3 | |
| 注入 | 推定値 | | 77.4 | 80.2 | 90.8 | 64.3 |
| | 工法費用 [%] | WD1 | 63.2 | 77.8 | 86.2 | 84.7 |
| | | WD2 | 69.4 | 77.7 | 83.7 | 78.6 |
| | WM | 70.3 | 79.6 | 85.7 | 77.9 | |
| 充填 | 推定値 | | 2.31 | 1.51 | 0.0249 | 35.0 |
| | 工法費用 [%] | WD1 | 0.872 | 0.499 | 0.00271 | 3.74 |
| | | WD2 | 0.397 | 0.651 | 0.00198 | 5.51 |
| | WM | 0.991 | 1.14 | 0.0188 | 7.84 | |

5. まとめ

鉄筋コンクリート壁部材の簡易的な損傷量推定手法として、ひび割れ幅分布特性を定める変数である対数標準偏差と平均ひび割れ幅をひび割れの幾何学的性状および進展機構に基づいて推定し、その変数を用いたひび割れ幅分布特性から修復費用を概算する方法を提案・検証した。以下に得られた知見を示す。

- 1) せん断ひび割れの幾何学的性状に基づいて、RC 壁部材の平均せん断ひび割れ幅を算出する手法を提案した。剛体がせん断ひび割れの向きに対して直交方向に変位した場合（ケース A）、剛体が部材水平方向にせん断変形した場合（ケース B）、ケース B においてせん断ひび割れの発生からひび割れ定常状態に至るまでの過程を踏まえ部材角の増大に伴ってひび割れ本数を増やした場合（ケース B-2）について検討し、検討対象試験体においてはケース B-2 の場合が平均ひび割れ幅を実験結果に近い値で推定できることを確認した。
- 2) ひび割れ幅分布特性の対数標準偏差は、ひび割れ定常状態到達前と定常状態到達後の 2 つに分割して最小二乗法により線形近似を行った。その結果、ひび割れ定常状態の前後に分けて線形近似をすることで、対数標準偏差を比較的精度良く平易な数式でモデル化できることを確認した。
- 3) 推定したひび割れ幅分布特性による修復費用と計測値から算出した修復費用を比較し、耐力低下前 (1/500 rad., 1/333 rad., 1/200 rad.時) においては補修方法ごとの修復費用（特に、被覆工法で修復するひび割れの修復費用比率と注入工法で修復するひび割れの修復費用比率）が総修復費用に占める割合を大きな誤差なく推定できた。
- 4) 修復費用算定において、実試験体において乾燥収縮ひび割れ（初期ひび割れ）が多い程、本研究の推定手法では小さめのひび割れ（補修方法として被覆工法を選択するひび割れ）を過小評価する傾向が見られた。今後、乾燥収縮の程度によるひび割れ性状への影響をパラメータ推定に取り入れることでより正確に補修費用を算定できる可能性がある。

謝辞

本研究は、科学研究費 基盤研究(B) (課題番号: 23H01548, 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, 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
- 4) 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, Paper No.237, Jul. 2010
- 5) 日本コンクリート工学会: コンクリートのひび割れ調査, 補修, 補強指針 2022, pp.113-116, 2022.6
- 6) 塚大祐, 千田紘之, 高橋典之: 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
- 7) 王一哲, 耳塚友貴, 千田紘之, 高橋典之: 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
- 8) 千葉幸大, 櫻井真人, 三浦翔大, 小林淳, 尾形芳博, 相澤直之: 微小変形領域における RC 造耐震壁の非線形性に関する検討 (その 19) 乾燥収縮ひび割れを変数とした耐震壁の静的載荷試験, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, 構造 II, pp.1157-1158, 2018.9
- 9) 佐藤真俊, 櫻井真人, 小林淳, 相澤直之: 微小変形領域における RC 造耐震壁の非線形性に関する検討 (その 23) 養生期間の異なる試験体の静的載荷実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.1259-1260, 2019.9
- 10) キム キョンミン, 塩原等, 高橋典之: 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
- 11) 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