

論文 RC 部材の地震被害写真からひび割れ幅を画像測定する手法に関する一提案

國友 弘隆^{*1}・吉岡 智和^{*2}

要旨：地震被害写真をひび割れのセグメンテーションを行い、ひび割れ直交方向の輝度分布情報を抽出し、その情報を基に単純な多層パーセプトロン（Multi-layer perceptron）によりひび割れ幅を回帰することで、比較的疎な輝度分布情報からひび割れ幅を推定する手法を提案する。この手法ではひび割れ軸を画像セグメンテーションにより抽出したひび割れ帯の midpoint から直線回帰し、その直交軸を設定した上で輝度分布情報を抽出した。推定したひび割れ幅は、人の手により実測したひび割れ幅に対し、概ね推定することができた。

キーワード：ひび割れ幅、せん断破壊、損傷度、深層学習

1. はじめに

大地震時に不足する専門家の代わりに RC 部材の地震被害写真に基づき損傷度¹⁾を推定する手法の一つとして、筆者らは、せん断破壊が先行する RC 柱の地震被害写真からその損傷度を推定する Deep neural network モデル（以下、DNN と略す）を用いた識別器を提案²⁾した。当該識別器では、写真-1 に示すように、RC 柱の地震被害写真からせん断破壊前後に相当する損傷度 III 以下、せん断破壊後に軸力支持能力を保持した状態に相当する損傷度 IV、及び軸力支持能力を喪失した損傷度 V には分類できるものの、せん断破壊に至る前までの損傷度 I、II、III をより細かく分類できない。他方、平成 28 年（2016 年）熊本地震で被災した旧耐震基準で設計された RC 造共同住宅の 1 階ピロティの地震被害例として、写真-2 に示すように、多くのピロティ柱がせん断破壊直前、直後の損傷度 III に相当する地震被害が生じており、余震による倒壊の危険性が極めて高いものがあつた。このような状況において、非専門家である住民は、ピロティ階の被害の様相を認知バイアスのため過小評価し易い。そのため、その地震被害写真を撮影するだけで、その危険性を非専門家たる住民に助言する仕組みの必要性は高い。なお、筆者らの提案した識別器²⁾はその一助となり得るが、損傷度 II 以下と III を区別する必要がある。そこで、それらの損傷度が幅 2mm 以下の残留ひび割れ幅の大小に依拠し分類¹⁾されることを勘案し、残留ひび割れ幅の画像測定を行うことで上記の損傷度の分類が可能となるとの考えに至った。

RC 部材の表面に生じるひび割れ幅の画像測定に関する既往研究は多数行われている。本研究では、最近の山本ら³⁾及び村上ら⁴⁾の研究成果に着想を得たひび割れ幅の画像測定法を提案する。山本ら³⁾は、ひび割れ画像からひび割れ断面の輝度分布を抽出し、その分布曲線

上の反曲点間の距離をひび割れ幅として測定するものである。この方法では、輝度分布曲線の反曲点を把握できるだけの十分な輝度情報、すなわち高解像度画像が必要となる。一方、村上ら⁴⁾は、画像セグメンテーションによりひび割れ検出し、その画素数からひび割れ幅を推定している。この方法でも、ひび割れ幅の推定精度は画像解像度に依存しているのに加え、DNN を用いた画像セグメンテーションに必要なひび割れの位置・形状情報を与える教師データの作成に大きな労力が必要となる。

本研究では、地震被害写真からひび割れのセグメンテーションを行い、ひび割れ断面の輝度分布情報を抽出し、その情報を基に単純な多層パーセプトロン（Multi-layer perceptron、以下 MLP と略す）によりひび割れ幅を回帰することで、比較的疎な輝度分布情報からひび割れ幅を推定する手法を提案する。本研究で採用した



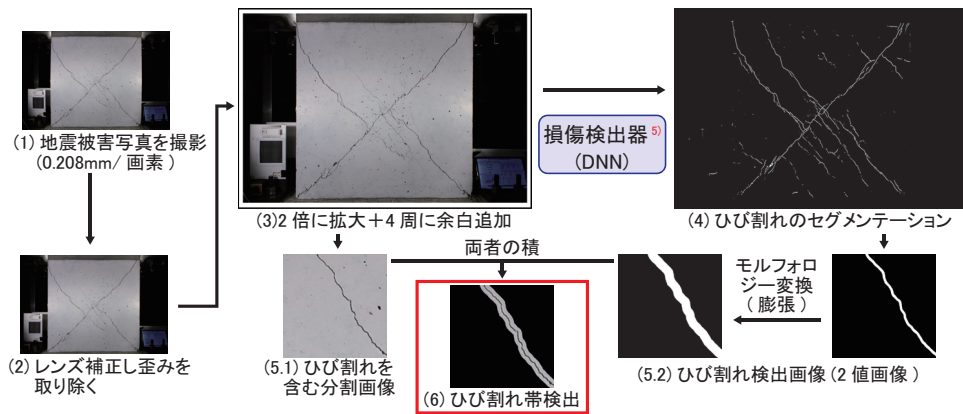
写真-1 DNNによるRC柱の損傷度の推定¹⁾



(1) 損傷度IIIのRC柱 (2) 余震に備えた応急補強
写真-2 RC造共同住宅のピロティ柱の地震被害例

*1 九州大学大学院 芸術工学研究府 芸術工学専攻 修士課程（正会員）

*2 九州大学大学院 芸術工学研究府 環境設計部門 教授 博士（工学）（正会員）



図－1 ひび割れ帯の検出手順

DNN によるひび割れの画像セグメンテーション⁵⁾では、学習に用いた教師データにおいて、幅 10mm 以下のひび割れでは、ひび割れに該当する全画素をアノテーションせず多直線で近似し位置情報のみを与える留め、教師データの作成を省力化したものである。本論文では、提案したひび割れ幅の画像測定法について、既往の実大 RC 方立壁の水平加力実験⁶⁾より得られた 1 画素当り約 0.2mm の解像度を持つ損傷写真を用い学習、検証を行い、ひび割れ幅 0.5mm ～ 3mm までの推定が可能な測定器を生成し、その推定精度を確認した。

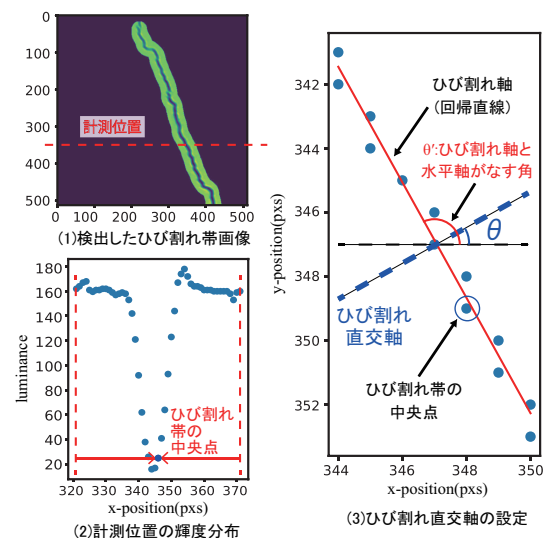
2. 提案するひび割れ幅の画像測定手法

提案するコンクリート表面に生じたひび割れ幅を画像測定する手法を説明する。提案法では、(1) ひび割れ帯を検出し、(2) 検出されたひび割れ帯から計測位置におけるひび割れ直交方向の輝度分布情報を抽出し、(3) 輝度分布情報から MLP を用いひび割れ幅を推定した。

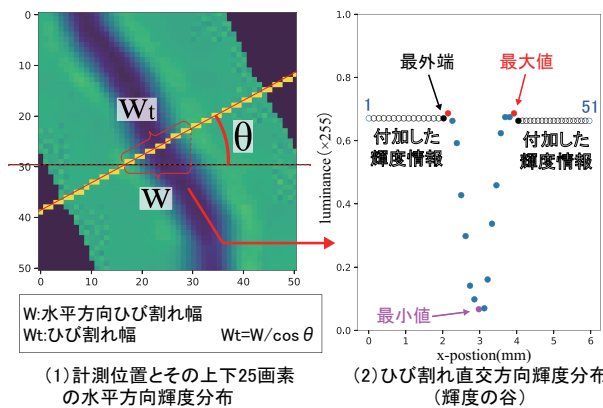
初めに、図－1 に示すひび割れ帯の検出手順について説明する。まず、RC 部材の地震時損傷写真を撮影し、レンズ補正を施す。その上で、既往研究⁵⁾で提案された DNN による RC 方立壁の地震時損傷検出器を用いひび割れの画像セグメンテーションを行う。画像セグメンテーションとは、画像の画素毎に異なるオブジェクト（ひび割れと背景）に分類することを指している。入力写真は、後述する撮影された画像上での計測値が 0.5mm 幅のひび割れが検出可能なように、Lanczos 法を用い 1 画素当りの長さが約 0.1mm となるよう拡大する。さらに、画像を余すことなく検出器へ入力できるように、その入力画像サイズ (512×512 画素) の整数倍となるように 4 周に余白を挿入した。次に、ひび割れ幅の測定対象となるひび割れを含む元画像と、それに対応する 2 値化したひび割れ検出画像（画像セグメンテーションにより、ひび割れに相当する画素の値 1、それ以外は 0 とした画像）について、画素毎の積をとり、ひび割れ帯を検出した。なお、ひび割れ検出画像がひび割れを十分に内包できるように、30×30 画素の楕

円形カーネルを用いたモルフォロジー変換（膨張）によりひび割れ検出領域を拡大した。そのためひび割れ帯の幅は約 6mm 以上とした。また、対象画像中に複数のひび割れが存在する場合は、ひび割れ検出画像（2 値画像）において輪郭検出を行い連続した検出領域毎に分解し、ひび割れを 1 本ずつに分けひび割れ帯を検出した。

続いて、検出されたひび割れ帯からひび割れ幅の計測位置におけるひび割れ直交方向の輝度分布情報の作成方法を説明する。初めに、ひび割れ幅の計測位置におけるひび割れ直交方向軸を定める方法を述べる。図－2 に示すように、ひび割れ帯の検出画像を 8bit (256 階調) グレースケール画像に変換する。その上で、ひび割れ幅の計測位置に該当する画素とその上下 6 画素、総計 13 画素の範囲において、ひび割れ帯の中央に位置する画素をその中央点とし選択し、その中央点を結ぶ直線を回帰分析により求めひび割れ軸とする。そのひび割れ軸と直交するひび割れ直交軸を設定し、その軸と水平軸がなす角を θ とした。続いて、ひび割れ直交方向輝度分布を求める方法を説明する。図－3 に示すように、ひび割れ直交



図－2 ひび割れ直交軸の設定

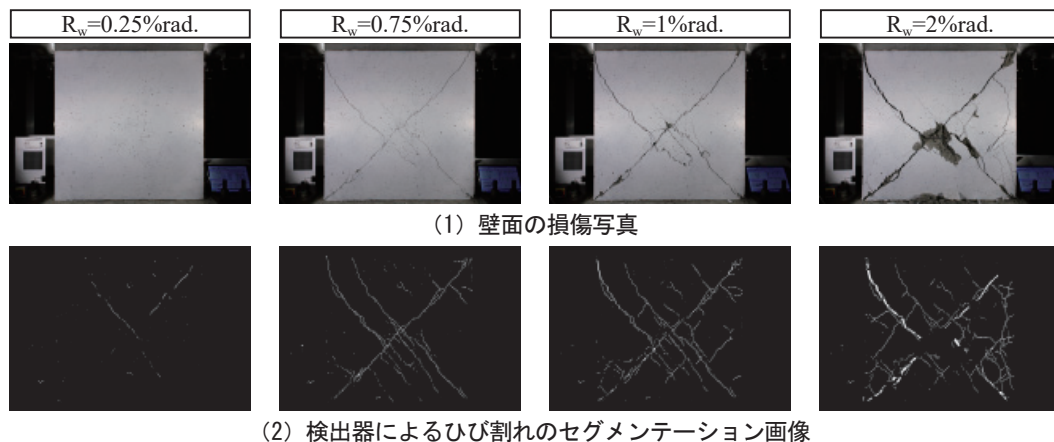


図－3 ひび割れ直交方向の輝度分布情報の抽出

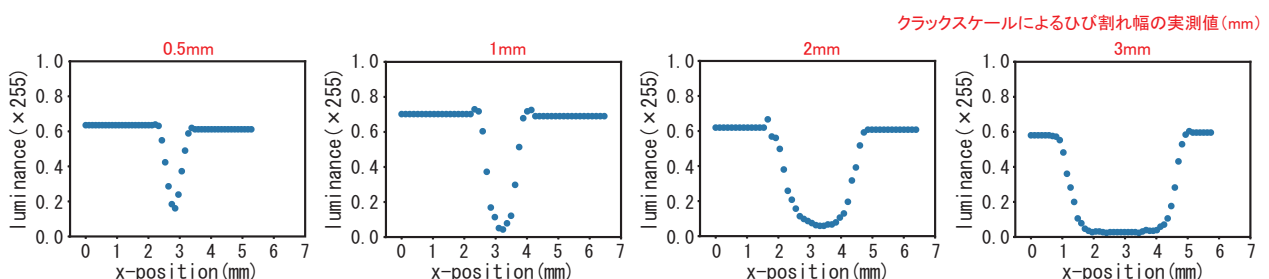
方向輝度分布として、ひび割れ幅の測定位置とその上下25画素の範囲の画素群において、ひび割れ直交軸上に位置する画素の輝度を抽出した。抽出したひび割れ直交方向輝度分布の最小値の位置を中心に、左右両側の範囲における最大輝度の位置から1画素外側の範囲までを再抽出し対象データとした。なお、ひび割れ直交方向の画素数は、後述するMLPによる回帰を行うため、画素数を51個に固定し、分布長さの最小値を約5.1mmに統一する。再抽出した輝度分布データ数がそれを満たさない場合は、その両端の輝度値を不足する数だけ両側均等となるように付加した。ひび割れ直交軸上の1画素の長さは、元の画素長さ（約0.1mm）にひび割れ直交軸と水平軸がなす角 θ の余弦で除し補正した。なお、当該角度

が45度より大きい場合は、上下方向を左右方向に、水平軸を鉛直軸に置き換えひび割れ直交方向輝度分布を抽出した。輝度の値は最大輝度255で基準化した。なお、1つのひび割れ直交方向輝度分布情報は、51組の左端を原点とした位置（mm）とその点における基準化された輝度により構成した。このようなひび割れ直交方向輝度分布情報を輝度の谷情報と称することとする。

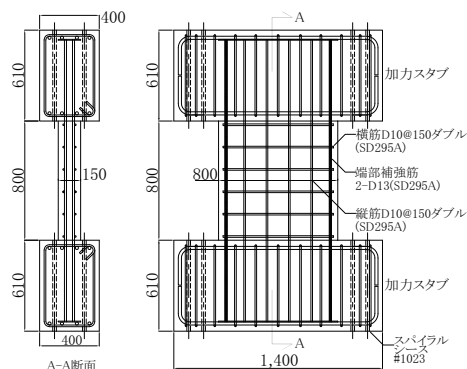
このような方法で、3章で後述する実大RC方立壁の水平加力実験⁶⁾より得られた壁面の損傷写真を対象に、452箇所の輝度の谷情報を収集した。図－4に、対象とした実大RC方立壁試験体の部材角 $R_w=0.25, 0.75, 1, 2\%$ rad. 終了後に除荷した時点の壁面（白色ペンキの塗装面）の損傷写真とDNN⁵⁾によるひび割れのセグメンテーション画像を示す。なお、損傷写真の1画素当りの長さは0.208mmである。加えて、図－5に、ひび割れ幅の実測値が0.5, 1, 2, 3mmとなる輝度の谷の代表例を示す。なお、図中のひび割れ幅の実測値は次の方法により計測した。損傷写真から、前述した方法によるひび割れ幅計測位置のひび割れ帯の画像（RGB、256階調のカラー画像）を抜き出し、実際の寸法の2倍の大きさとなるように液晶ディスプレイに表示する。その上で、2倍に拡大したクラックスケールを用い目視によりそのひび割れ幅を測定した。収集した輝度の谷情報は、ひび割れ幅の実測値が0.3mm以上3mm以下の範囲に限定した。また、ひび割れ幅の実測値が1.5mm以下の輝度の谷情報について、輝度の最小値が51個の



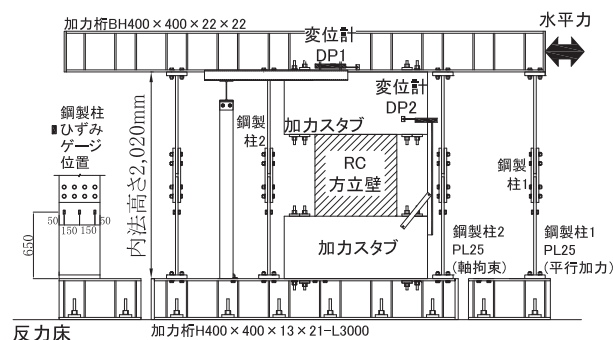
図－4 RC方立壁の損傷写真（塗装面）⁶⁾と検出器⁵⁾によるひび割れのセグメンテーション画像



図－5 輝度の谷情報の代表例



図－６ 試験体の形状寸法及び配筋



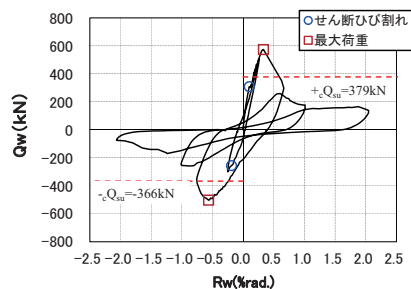
図－７ 加力装置、及び変位等の計測位置

表－１ コンクリートの圧縮試験結果

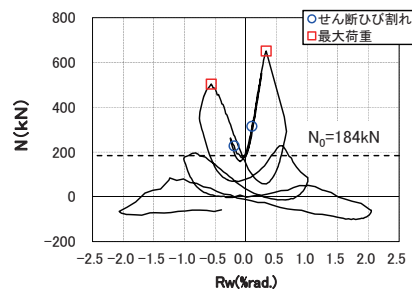
試験体名	設計基準強度 F_c (N/mm^2)	材令 (日)	圧縮強度 σ_b (N/mm^2)	ヤング係数 E (kN/mm^2)	単位体積重量 (kN/m^3)
D800-0	24	22	28.1	27.4	2.2

表－２ 鉄筋の引張試験結果

呼び径	使用箇所	種類	降伏点 σ_y (N/mm^2)	引張強さ σ_t (N/mm^2)	ヤング係数 E (kN/mm^2)	降伏ひずみ ε_y (μ)
D10	壁筋	SD295A	366	484	178	2035
D13	端部補強筋		343	468	182	1875



図－８ 壁せん断力 Q_w と壁部材角 R_w の関係



図－９ 壁拘束軸力 N と壁部材角 R_w の関係

中心（26番目）になるように補正し、それを超えるひび割れ幅の場合は最大値間の中央が中心（26番目）になるよう調整した。図－５に示すように、ひび割れ幅の実測値の増加に伴い、深くかつ幅が広くなり、形状がV字からU字に変化した。クラックスケールを用いた目視によるひび割れ幅の実測では、輝度が閾値以下となる範囲の幅を認識していると考えられる。そこで、意味ある輝度情報が疎な場合から比較的に密な場合を含む輝度の谷情報から、網羅的にひび割れ幅の実測値を回帰するモデルは定め難い。そこで、本研究では、MLPを用いて輝度の谷情報からひび割れ幅の回帰を試みた。4章にひび割れ幅推定のためのMLPモデル、及びその学習と精度検証について後述する。

3. 損傷写真を取得したRC方立壁の水平加力実験

ひび割れ損傷写真を取得した実大RC方立壁の水平加力実験⁶⁾の実験方法、及び実験結果について、図－６に試験体の形状寸法及び配筋、表－１にコンクリートの圧縮試験結果、表－２に鉄筋の引張試験結果をそれぞれ示す。実験に使用した試験体は、マンションの共用廊下側に見られるRC方立壁を模擬した実大試験体である。

試験体は、壁厚150mm、壁高800mm、壁長800mm、コンクリート強度 $F_c=24\text{N/mm}^2$ のせん断破壊型RC方立壁とした。方立壁の上下には加力用鋼製骨組への取り付けに用いるスタブを設けた。方立壁には、縦筋としてD10@150 (SD295A)、端部補強筋としてD13 (SD295A)、横筋としてD10@150 (SD295A)を配筋した。なお、壁筋をダブル、端部補強筋を2本配筋した。

図－７に実験に用いた加力装置及び変位等の計測位置を示す。加力は大地震時の応答を模擬するため、試験体を鋼製骨組に取り付け、上部の鋼製骨組に接続した750kNアクチュエータにより水平方向に強制変位を与えた。なお、RC方立壁には初期軸力は与えず、試験体直近に鋼製柱を設け、水平加力時の試験体の剛体回転に伴う伸長を拘束することで、せん断破壊時にせん断力と同程度の圧縮軸力をRC方立壁に作用させることを企図した。壁水平変位として、2, 4, 8, 16mmを正負方向で1回与えた。計測データとして、水平力、層間変位(DP1)、壁水平変位(DP2)、試験体の拘束軸力、壁面の損傷写真を記録、収集した。壁面的一方は白色ペンキを塗布した塗装面とし、他方はそのまま利用した打放面とした。

壁せん断力 Q_w と壁部材角 R_w の関係を図－８に、壁

拘束軸力 N と壁部材角 R_w の関係を図－9に示す。ここで、壁せん断力は、水平力から鋼製骨組の水平剛性 (0.661kN/mm) に層間変位を乗じ求めた鋼製骨組の負担せん断力を除いた値とした。壁拘束軸力は、鋼製柱の軸剛性 ($2.05\text{kN}/\mu$) に計測した鋼製柱の伸縮ひずみを乗じ算定した。なお、図中の初期軸力 N_0 は、試験体を加力装置に取付時に意図せず導入された軸力を示している。壁部材角は上下加力スタブ間の相対水平変位 (DP2で計測した壁水平変位) を壁高 800mm で除し求めた。

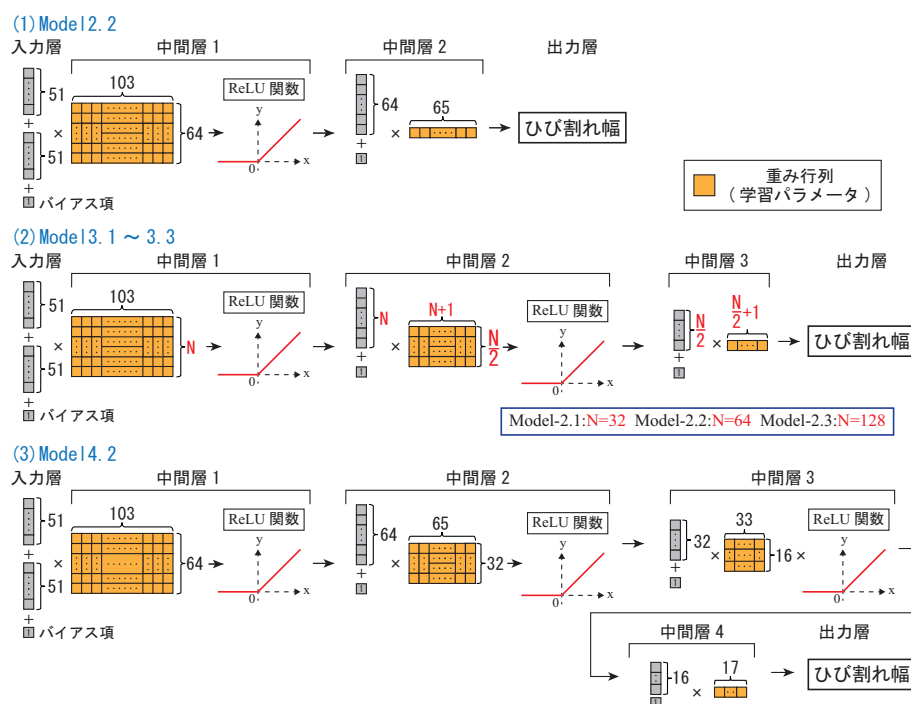
実験結果として、実大RC方立壁実験体は、 $R_w=\pm 0.1\%$ 前後でせん断ひび割れが生じ、 $R_w=+0.5, -0.51\%$ で最大耐力 ($574\text{kN}, -502\text{kN}$) を発揮した後にせん断破壊し、負担できる Q_w が大幅に低下した。試験体は想定した通り最大せん断力を発揮した際に計測された拘束軸力 ($651\text{kN}, 503\text{kN}$) の影響でせん断破壊した。

4. ひび割れ幅推定のためのMLPの学習と精度検証

MLPを用いひび割れの輝度の谷情報からひび割れ幅を回帰する推定器の生成方法について説明する。輝度の谷情報とひび割れ幅との回帰に用いるMLPとして5つのモデルを用意し、推定精度の高いものを採用する。図－10にMLPモデルの概要を示す。いずれのモデルにおいても入力層 (51×2 次元ベクトル、輝度の谷情報＝左端を原点とする位置 $\text{mm} \times$ 正規化した輝度 $0 \sim 1$)、出力層 (スカラー、ひび割れ幅) は共通しており、中間層の層数とニューロン数を変更した。中間層での活性化関数としてはReLU (Rectified Linear Unit, 正規化線形関数) を利用し非線形化した。Model2.2の中間層は2層、第1層のニューロン数

を64、第2層のニューロン数を1とした。Model3.1～3.3では中間層を3層とし、第1層のニューロン数を32、64、128に変更し、第2層のニューロン数をそれぞれ第1層の半分のニューロン数、第3層のニューロン数を1とした。Model4.2では中間層を4層とし、第1層のニューロン数を64、第2層のニューロン数を32、第3層のニューロン数を16、第4層のニューロン数を1とした。学習、検証に用いたひび割れの輝度の谷情報は、2、3章で示したRC方立壁の水平加力実験より収集した損傷写真より得られた452個を用い、その8割を学習に2割を検証に利用した。MLPを用いたひび割れ幅推定器の生成には、Python3.8.15上の深層学習ライブラリKeras2.10.0を利用した。MLPの中間層の重み行列 (学習パラメータ) は、バッチサイズ16、エポック数100、最適化アルゴリズムRMSprop、学習率 $1/1000$ 、損失関数に平均二乗誤差を採用し、損失関数が最小となるように繰返し計算を行い学習パラメータの最適化を行った。採用した学習パラメータは検証データに対する損失関数が最小となるものとした。図－11中の左上に、Model3.1の学習曲線として、学習、検証データに対する損失関数 (loss, val_loss) とエポック数 (繰返し計算の回数) の関係の代表例を示す。

図－11に各モデルのひび割れ幅の観測値と推定値の比較を示す。図中の破線はひび割れ幅の観測値に対する推定値の比率が0.8、1.2の位置を示し、図中のAve. が標本平均をS.D. が標本標準偏差を示している。図－11に示すように、中間層が3層、第1層のニューロン数が128のModel3.3が、他のモデルに比較し、ひび割れ幅の観測値に対する推定値の比のばらつきが小さく、その



図－10 MLPモデルの概要

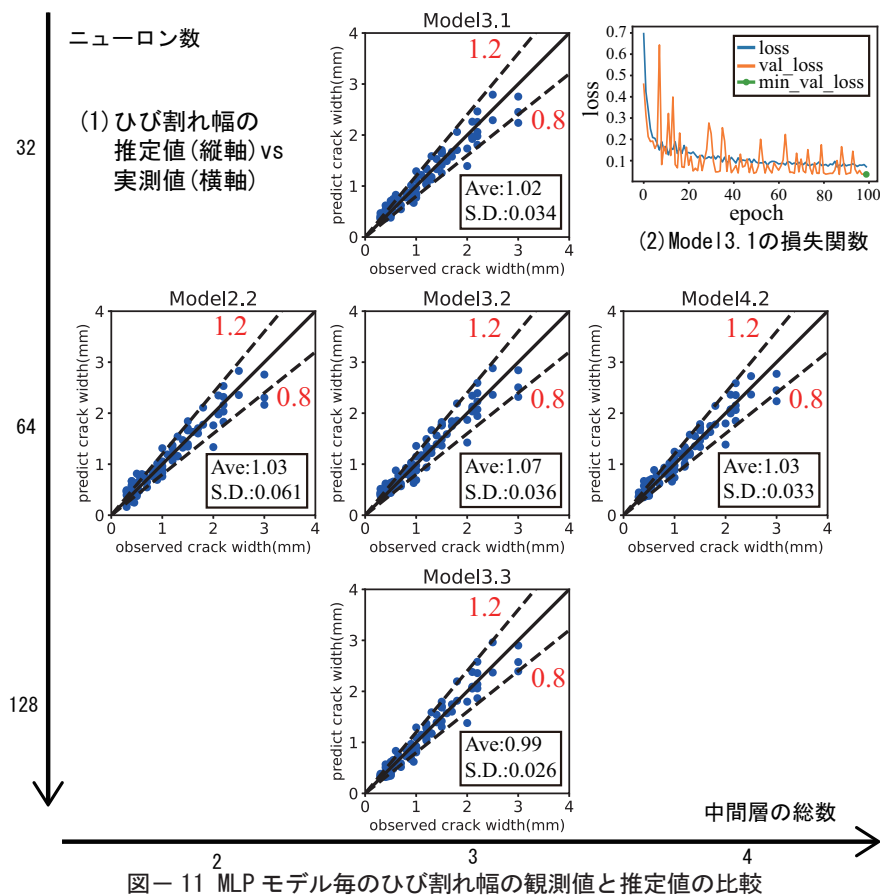


図-11 MLPモデル毎のひび割れ幅の観測値と推定値の比較

平均値も最も1に近い値となった。一方、学習パラメータの少ないModel2.2では、他モデルに比較し観測値に対する推定値の比のばらつきがやや大きくなるものの、モデル間での推定精度の差は小さく、設定した中間層の総数及びニューロン数を持つMLPによりひび割れ幅を精度よく回帰可能であった。

5. まとめ

RC方立壁の損傷写真からDNNによりひび割れをセグメンテーションし、計測位置のひび割れ直交方向輝度分布(輝度の谷)の情報からひび割れ幅を推定するMLPを深層学習により生成した。生成したMLPにより概ねひび割れ幅の実測値を推定することができた。

参考文献

- 1) 震災建物の被災度判定基準及び復旧指針改定委員会，2015年改訂版震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧指針[鉄筋コンクリート/鉄骨鉄筋コンクリート造編]，日本建築防災協会，2016.3
- 2) 國友弘隆，吉岡智和：RC方立壁を対象とした学習済み損傷度識別器のせん断破壊型RC柱への応用，コンクリート工学年次論文集，Vol. 44，No. 2，p. 1039-1044，2022.6
- 3) 山本慎，向井智久，衣笠秀行：明るさの異なる高

解像度画像を用いた柱部材のひび割れ幅評価，日本建築学会技術報告集，Vol.27，No.67，p.1547-1552，2021.10

- 4) 村上奨太，鎌田聖也，高瀬裕也，溝口光男：様々な学習モデルによる鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅計測に関する考察，Vol.28，No.69，pp.673-678，2022.6
- 5) 吉岡智和，竹田昂輔：画像測定したコンクリート剥落面積に基づくRC方立壁の部材角推定，日本建築学会技術報告集，Vol.28，No.70，pp.1224-1229，2022.10
- 6) 吉岡智和：深層学習を用いた被害写真に基づく震災マンションの早期復旧支援ツールの開発，(公)大林財団2019年度研究助成実施報告書，参照：https://www.obayashifoundation.org/upload/pdf/2019_Kenkyu_Houkoku_38_Yoshioka_Tomokazu.pdf（閲覧日：2022年11月30日）

謝辞

本研究は，九州大学数理・データサイエンス教育研究センター（2022年度数理・データサイエンスに関する教育・研究支援プログラム，研究代表者：吉岡智和）の助成を受けた。また，(公財)大林財団の2019年度研究助成（研究代表者：吉岡智和）により得られた研究成果を利用した。ここに記し謝意を表する。