

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04354

研究課題名（和文）深層学習を用いたRC非構造壁の被害写真に基づく地震時応答推定法に関する研究

研究課題名（英文）A Study on Seismic Response Prediction Method Based on RC Non-Structural Wall Damage Photographs Using Deep Learning

研究代表者

吉岡 智和 (Yoshioka, Tomokazu)

九州大学・芸術工学研究院・教授

研究者番号：40304852

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、マンションの住民が撮影したRC方立壁の地震被害写真から、その損傷量を画像測定し経験した最大部材角を推定する手法の確立を目指した。その研究の一環として、せん断破壊を想定したせん断スパン比0.5～0.67の実大RC方立壁の水平加力実験を行い、コンクリート剥落欠損面積と部材角の関係式を実験結果より導出した。被災マンションで撮影されたRC方立壁の被害写真を訓練データに用い、事前学習済み深層学習モデルのファインチューニングを行い、RC方立壁に生じるひび割れ、コンクリート剥落欠損を別々に抽出する検出器の生成し、画像測定したコンクリート剥落欠損面積から経験部材角を推定する手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、区分所有の共同住宅（所謂、分譲マンション）の地震被害情報を、震災時の意思決定に大きな困難を抱える区分所有者に速やかに提供することで、復旧工事の実施、継続使用に向けての早期の合意形成を支援することを目的の一つとしている。また、大都市のマンション化率は30%前後であり、都市に所在する膨大な数の共同住宅の地震被害情報を、デジタルデータとして行政等の組織が一元的に収集、管理することで、より効率的な復旧支援、復旧計画の立案が可能となり、本研究の成果は震災に対する都市の強靱な回復力（レジリエンス）の向上を図るための基礎技術となり得る。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to establish a method for estimating the maximum member angles experienced by condominium residents by measuring the amount of damage from photographs of earthquake-damaged RC vertical walls taken by them. As a part of this research, horizontal loading tests were conducted on full-scale RC vertical walls with shear span ratios of 0.5 to 0.67, assuming shear failure, and an equation relating the area of concrete loss and member angle was derived from the test results. Using photographs of damage to RC vertical walls taken at a damaged condominium building as training data, we proposed a method for estimating the experienced member angle from the measured concrete loss area by generating a detector to extract cracks and concrete loss separately by fine-tuning a pre-trained deep learning model. The proposed method is to estimate the experienced member angle from the measured concrete delamination loss area.

研究分野：建築構造

キーワード：地震被害 深層学習 RC方立壁

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

平成 28 年 (2016 年) 熊本地震では 20% 以上の区分所有された共同住宅 (以下、マンション) が「半壊」以上の被害を受け、その復旧が大幅に遅れるという事例が多数見られた。マンションは重要な社会インフラであるため、その復旧の遅れは都市機能の回復の大きな障害となっている。被災マンションの復旧には、専門家による現地調査を伴う被災度の推定と、それに基づく復旧の可否判断が必要である。しかし、震災時には専門家が圧倒的に不足するため、その状況が被災マンションの迅速な復旧と継続使用の判断を妨げる結果となっている。

被災マンションの多くは、RC 非構造壁がせん断破壊するものの、架構の地震被害は小破から中破程度であり、復旧工事を施し継続使用できる場合が多い。このような RC 非構造壁は、耐力壁として設計しておらず、架構に比較し可撓長さ (せん断スパン比) が小さく、架構と適切に縁切りされていないため、架構の地震応答が小さい範囲で破壊し易い。そこで、せん断破壊し易い RC 非構造壁の損傷量を計測することで、ラーメン架構の地震応答推定が可能と考えた。そこで、事前に専門家が余裕を持ってマンションにおいて撮影する RC 方立壁の位置を設定し、被災時に住民が極めて少数の写真を撮るだけで、専門家が現場に赴くことなく、被災マンションの地震応答を推定する手法を提案する (図 1)。提案法の手順は、事前に専門家が定めた RC 方立壁について、被災時に住民がその被害写真を撮影する。その写真から、RC 方立壁の地震時損傷を検出し、画像測定する。測定した損傷量から RC 方立壁が経験した最大部材角を推定する。さらに、RC 方立壁の最大部材角からそれが設置されている層の最大層間変形角を推定するものである。

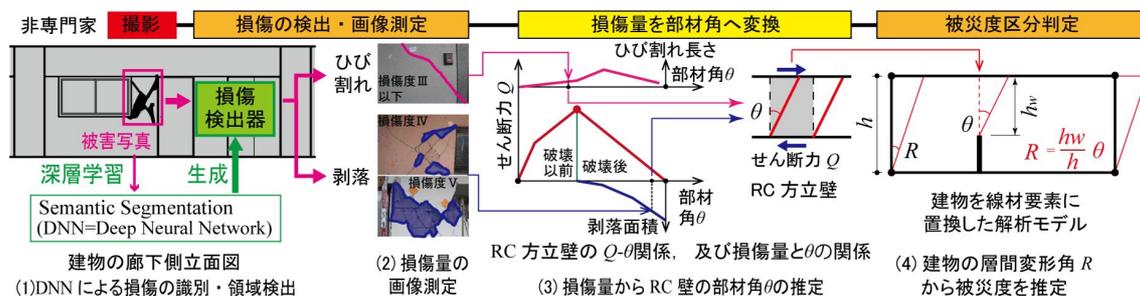


図 1 RC 方立壁の地震被害写真から被災マンションの被災度を推定する手法

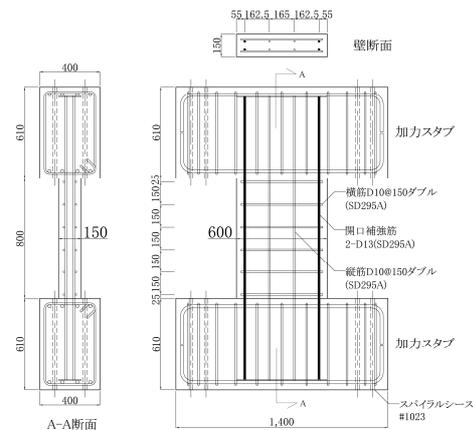
2. 研究の目的

本研究では、RC 非構造壁として RC 方立壁に着目し、図 1 に示す非専門家が撮影した RC 方立壁の地震被害写真から、その損傷量を画像測定し経験した最大部材角を推定する手法の確立を目指している。そこで、(1) せん断破壊を想定したせん断スパン比 0.5 ~ 0.67 の実大 RC 方立壁の水平加力実験を行い、損傷量として主にコンクリート剥落欠損面積に着目し、コンクリート剥落欠損面積と部材角の関係式を実験結果より導出する。(2) 被災マンションで撮影された RC 方立壁の被害写真を訓練データに用い、事前学習済み深層学習モデルのファインチューニングを行い、RC 方立壁に生じるひび割れ、コンクリート剥落欠損を別々に抽出する検出器の生成を試みる。

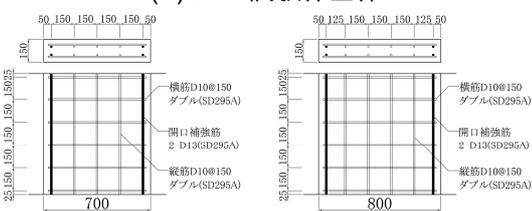
3. 研究の方法

(1) 実大 RC 方立壁試験体の水平加力実験：

図 2 に試験体の形状・寸法、及び配筋を示す。実験に使用した試験体は、共同住宅共用廊下側に見られる RC 方立壁を模擬した実大試験体とし、壁厚 150mm、壁高 800mm、コンクリート設計規準強度 $F_c=24\text{N/mm}^2$ を採用したせん断破壊型 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加力スタブを設けた。方立壁の壁筋はダブル配筋とし、縦筋には D10@150 (SD295A、 $p_{wv}=0.63\%$)、端部補強筋とし D13 (SD295A) 横筋には D10@150 (SD295A、 $p_{wh}=0.63\%$) を配筋した。実験変数として壁長を 600、700、800mm (せん断スパン比 0.67、0.57、0.5) を変更し、同一条件下で 3 体の実験を行った。本報告では、これら試験体群を D600、D700、D800 と呼称する。なお、D800 と同様の形状・寸法で、壁筋をシングル配筋として試験体群 (S800) も実施したが、紙面都合上その報告は省略する。



(1) D600 試験体全体



(2) D700 (左)、D800 (右) の壁部分

図 2 試験体の形状・寸法、及び配筋

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圧縮軸力をRC方立壁に作用させた。与えた強制変位は、壁水平変位として1、2、3、3.5、4、4.5、5、6、7、8、10、12、14、16、18、20、22、24、26、28、30、32、36、40mm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、壁水平変位、拘束軸力、壁面上の損傷写真を収集した。壁面の損傷写真は、壁面から1.2m離れた位置から壁面に正対し撮影した。損傷写真の画素数を横6000×縦4000とし、1画素当り0.201mm~0.215mmの解像度が得られた。壁面の一方は白色ペンキを塗布(塗装面と称す)し、他方はそのまま利用した(打放面と称す)。損傷写真は、壁面両面について、強制変位毎の正負のピーク時と除荷時に撮影した。

(2) RC方立壁の地震時損傷検出器の生成:

Semantic Segmentationを用いRC方立壁の地震時損傷を検出するため、深層学習モデルとしてDeepLab V3+(図3)を採用し、その事前学習モデルのファインチューニングを行った。訓練には、熊本地震における被災マンションの被害調査で撮影したRC方立壁の被害写真を利用した。訓練に用いた被害写真は、ロッドテープ等を同時に撮影し1画素当りの長さが把握できる写真に限定した。さらに、1画素当りの長さが前述した実験により収集したRC方立壁の損傷写真の解像度の平均値0.208mm/画素に一致するように拡大縮小し、その画像の横縦の画素数が深層学習モデルへの入力サイズ(512×512)の整数倍となるように四周に余白を付加し、その画像を入力サイズに分割し約64,000枚の訓練画像(512×512×3RGB)を作成した。訓練時間の減少のため、ひび割れ損傷を含む画像約16,000枚、コンクリート剥落・欠損を含む画像約10,000枚、無損傷画像10,000枚(別途撮影したコンクリート打放面を含む)を訓練に利用した。

ひび割れ、コンクリート剥落欠損領域をセグメンテーションする場合に、異なる画像の入力、処理方法を採用した。図4に示すように、ひび割れを検出する場合の入力画像は、極細幅のひび割れの検出精度を向上させるため損傷写真を2倍に拡大し、入力画像の解像度を0.208mm/画素から0.104mm/画素に変更した。一方、コンクリート剥落欠損領域を検出する場合は、剥落欠損領域を1つの大きな塊として認識し易いように損傷写真を1/2に縮小し、入力画像の解像度を0.208mm/画素から0.416mm/画素に変更した。その後の処理は、両者とも同一であり、画像の横縦の画素数が深層学習モデルへの入力サイズ(512×512)の整数倍となるように四周に余白を付加し、その画像を入力サイズに分割した。分割の際には、水平、鉛直方向に256画素(入力サイズの半分)ずつ重複するように分割し、部分入力画像を作成した。全ての部分入力画像をDNNモデルに入力し、得られた損傷を画像セグメンテーションした損傷検出画像(512×512画素)を統合し1枚の損傷検出画像を作成した。統合の際に、重複箇所については、検出結果の和集合を採用した。検出したひび割

れ、コンクリート剥落欠損領域をセグメンテーションする場合に、異なる画像の入力、処理方法を採用した。図4に示すように、ひび割れを検出する場合の入力画像は、極細幅のひび割れの検出精度を向上させるため損傷写真を2倍に拡大し、入力画像の解像度を0.208mm/画素から0.104mm/画素に変更した。一方、コンクリート剥落欠損領域を検出する場合は、剥落欠損領域を1つの大きな塊として認識し易いように損傷写真を1/2に縮小し、入力画像の解像度を0.208mm/画素から0.416mm/画素に変更した。その後の処理は、両者とも同一であり、画像の横縦の画素数が深層学習モデルへの入力サイズ(512×512)の整数倍となるように四周に余白を付加し、その画像を入力サイズに分割した。分割の際には、水平、鉛直方向に256画素(入力サイズの半分)ずつ重複するように分割し、部分入力画像を作成した。全ての部分入力画像をDNNモデルに入力し、得られた損傷を画像セグメンテーションした損傷検出画像(512×512画素)を統合し1枚の損傷検出画像を作成した。統合の際に、重複箇所については、検出結果の和集合を採用した。検出したひび割

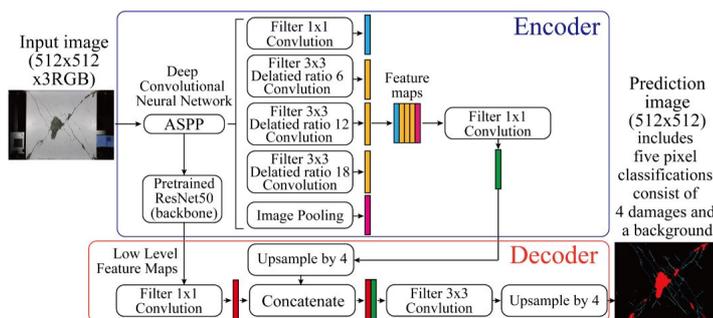
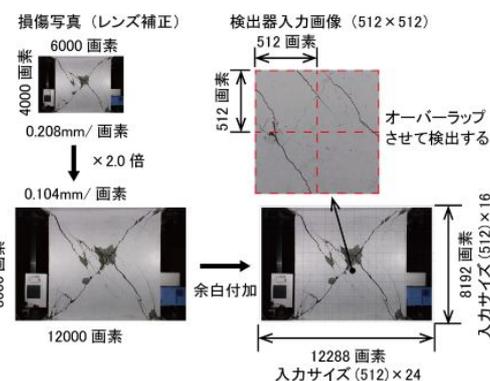
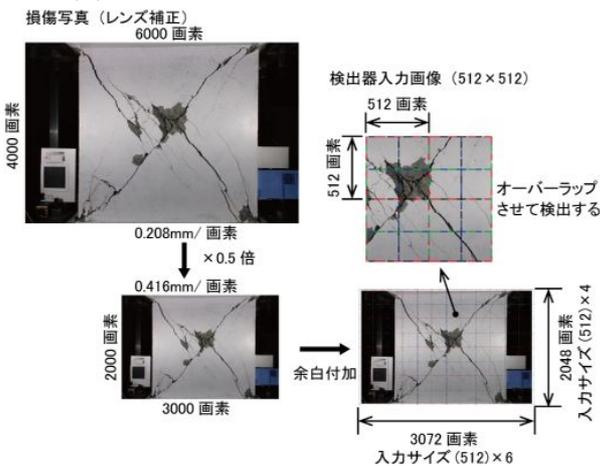


図3 DeepLab V3+モデルの概要



(1)ひび割れを検出する場合の入力画像



(2)剥落欠損を検出する場合の入力画像

図4 入力画像の作成方法

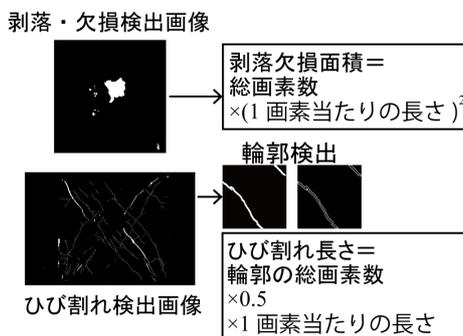


図5 ひび割れ長さ、剥落欠損面積の算定法

れ、コンクリート剥落欠損から図5に示す方法により、ひび割れ長さ、コンクリート剥落欠損面積を算定した。

4. 研究成果

(1)実大 RC 方立壁試験体の水平加力実験の結果、及びコンクリート剥落欠損面積と部材角の関係の回帰方法

実験結果として、D600-1、D700-1、D800-1の壁せん断力 Q_w と部材角 R_w の関係を図6に、壁拘束軸力 N と部材角 R_w の関係を図7に代表例として示す。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するせん断力を除いた値とした。部材角は、上下加力スタブ間の相対水平変位 (壁水平変位) を壁高 800mm で除し求めた。壁拘束軸力は、正側が圧縮軸力を負側が引張軸力示している。なお、RC方立壁試験体には初期軸力を導入しないように計画したが、D600-1、D700-1、D800-1には初期軸力 $N_0 = -22.5$ 、 -31.4 、 131 (軸力比 -0.01 、 -0.01 、 0.03) が導入された。この要因は、試験体を加力用鋼製骨組に取り付ける際に、試験体の上加力スタブと鋼製骨組の上加力桁の間に、数mm厚さの無収縮モルタルを敷き隙間が出来ないように圧着したが、敷モルタル厚さの制御が不十分であったため、加力装置の軸拘束用の近接な鋼製柱と上加力桁を高力ボルトで締め付ける際に、圧縮軸力又は引張軸力が各試験体に作用したものである。図6、図7中の丸印は最初にせん断ひび割れが発生した点を、四角印は正負加力時それぞれの最大荷重を發揮した点を示した。図6中の破線は、荒川 mean 式により最大荷重時に計測した拘束軸力を考慮し算定したせん断終局強度の計算値を示す。

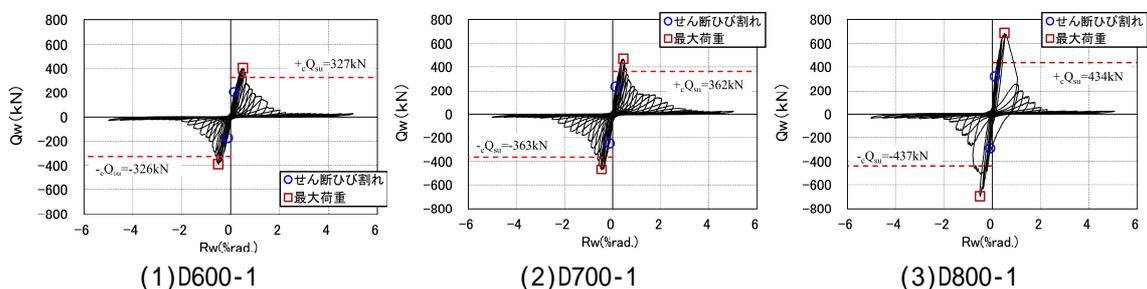


図6 壁せん断力と部材角の関係

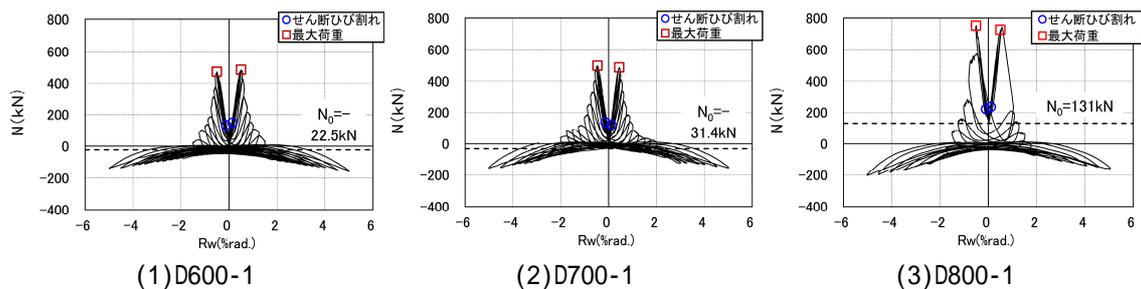
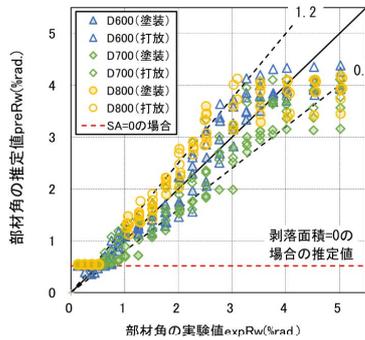


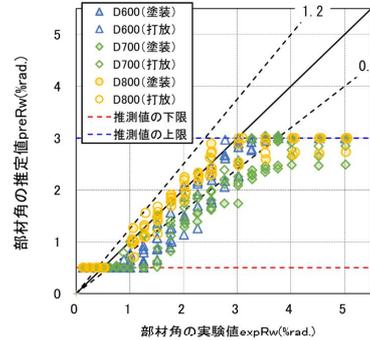
図7 壁拘束軸力と部材角の関係

D600-1では $R_w = +0.14$ 、 -0.12% rad.で、D700-1では $R_w = +0.12$ 、 -0.13% rad.で、D800-1では $R_w = \pm 0.1\%$ rad.前後でせん断ひび割れが生じた。続いて、D600-1は $R_w = \pm 0.5\%$ rad.で最大荷重 403 、 -389kN を發揮した後に、壁せん断力が部材角の増加に伴い大幅に低下した。これは、壁面に生じたせん断ひび割れ幅の拡大、壁中央のコンクリートの圧壊、欠損に伴い発生しており、想定通りに拘束軸力 (正、負の最大荷重時 485 、 473kN) の効果でRC方立壁は曲げ破壊に先行しせん断破壊した。同様に、D700-1は $R_w = +0.45$ 、 -0.46% rad.で最大荷重 466 、 -470kN (拘束軸力 487 、 498kN) を發揮し、D800-1は $R_w = +0.5$ 、 -0.51% rad.で最大荷重 688 、 -696kN (拘束軸力 726 、 752kN) となり、その後はせん断破壊したことで部材角の増加に伴いせん断力が大幅に低下した。

続いて、せん断スパン比を考慮しつつコンクリートの剥落欠損面積から経験した部材角を回帰する手法を報告する。回帰には、関数の万能近似性を有する単純なニューラル・ネットワークを用いた。回帰に用いたモデルは入力層 (せん断スパン比と単位剥落面積 m^2/m^2 、2次元)、中間層1 (1024次元の特徴ベクトル)、中間層2 (512次元の特徴ベクトル)、中間層3 (256次元の特徴ベクトル)、出力層 (経験した部材角 $\%$ rad.スカラー)とした。中間層1~3においてRELU (正規化線形) 関数により非線形変換を行った。学習には実験で得られた単位剥落面積とRC方立壁のせん断スパン比、教師データにその単位剥落面積が観測された部材角の実験値を用いた。382組の学習データの中で85%を訓練に、15%を検証に利用した。学習は、最適化アルゴリズムにRMSprop、損失関数に平均二乗誤差を採用し、学習率 $1/1000$ 、バッチサイズ 16 、エポック数 100 で学習させ、検証データに対する損失関数が最小となったパラメータ (中間層における線形変換のための重み行列) を採用した。



(1)提案法



(2)図9に示す回帰式

図8 剥落面積から推定した部材角と実験値の比較

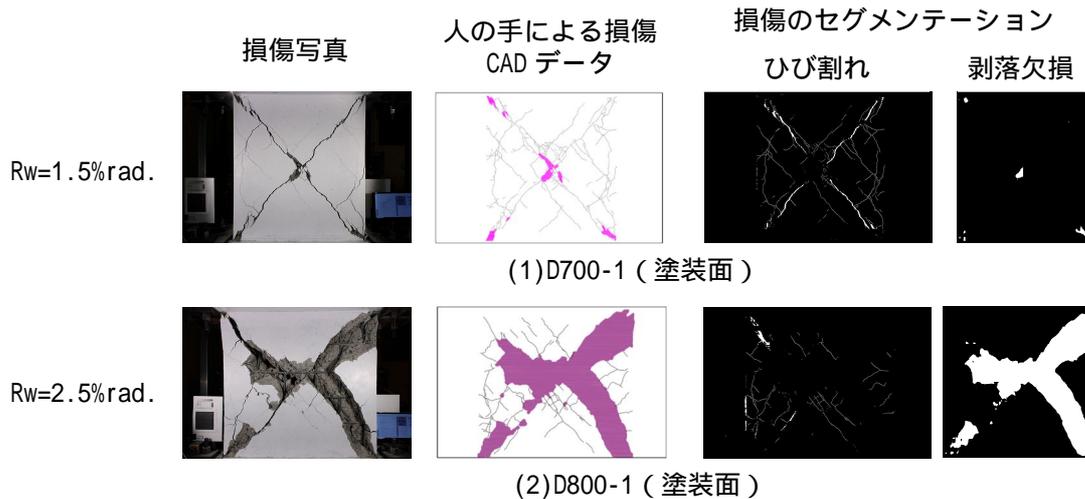
測された部材角の実験値との関係を示す。図8に比較のため、図9に示すD800のみの実験結果より導出された単位剥落面積から部材角を推定する回帰式による推定した部材角とその実験値の関係を示す。図8に示すようにニューラルネットワークモデルはD800より得られた実験結果を合致した回帰式と比較し、せん断スパン比を学習させたことで、実験結果と推定値が良い対応(推定値/実験値の平均値1.02、標本標準偏差0.18)し、部材角0.5%rad.(せん断破壊前)から4%rad.(抵抗力喪失点)を除き、単位剥落面積から経験した部材角を±20%の範囲で概ね推定できる可能性を示した。

(2)深層学習モデルを用いたRC方立壁の地震時損傷検出器の検出精度

図10にD700-1、D800-1試験体(塗装面)の損傷写真、人の手による損傷の検出画像、及び深層学習モデルによる損傷の検出画像を代表例として示す。図11、図12にD800-1試験体の塗装面における単位ひび割れ長さ、及び単位剥落面積と部材角の関係について、深層学習モデルにより画像測定した値と、人の手による測定値の比較を示す。

図10に示すように、深層学習モデルによりひび割れ、コンクリート剥落欠損領域を概ね検出可能であった。また、図11、図12に示すように、深層学習モデルの検出結果から算定した単位ひび割れ長さ及び単位剥落面積は、人の手により画像測定をやや過小評価する場合もあり得るが概ね良い対応を示した。

以上の結果、前述したRC方立壁のコンクリート剥落欠損面積と部材角の関係式に、RC方立壁の地震被害写真から深層学習モデルを用い画像測定したコンクリート剥落欠損面積を代入することで、RC方立壁の経験した部材角を推定できる可能性を示した。



(1)D700-1 (塗装面)

(2)D800-1 (塗装面)

図10 損傷セグメンテーションの代表例

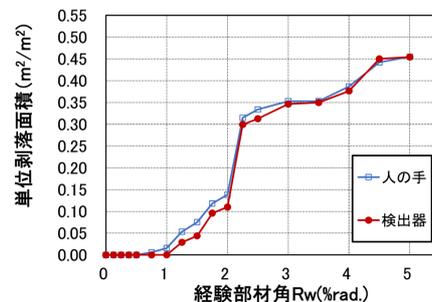
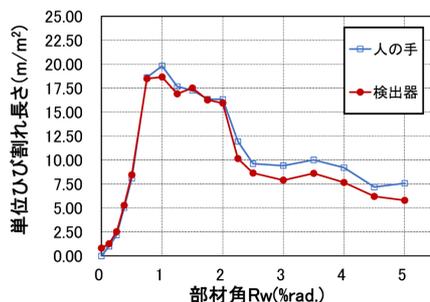


図11 単位ひび割れ長さの比較 (D800-1 塗装面) 図12 単位剥落面積の比較 (D800-1 塗装面)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 吉岡智和, 竹田昂輔, 川島聖, 渡辺和樹	4. 巻 44
2. 論文標題 事前学習済みDNNモデルのファインチューニングによるRC方立壁の地震時損傷検出器の生成と損傷の画像測定	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1033-1038
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 吉岡智和, 竹田昂輔	4. 巻 28
2. 論文標題 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	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 1224-1229
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.28.1224	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 吉岡智和, 竹田昂輔
2. 発表標題 DNNモデルを用いた損傷画像測定に基づくRC方立壁の部材角推定 その1: RC方立壁の損傷写真収集実験
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会 (北海道) 学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹田昂輔, 吉岡智和
2. 発表標題 DNNモデルを用いた損傷画像測定に基づくRC方立壁の部材角推定 その2: DNNモデルを用いたコンクリート剥落・欠損領域の画像測定
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会 (北海道) 学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jang Subhin, 竹田昂輔, 吉岡智和
2. 発表標題 シングル配筋された RC 方立壁の地震時損傷に関する実験的研究
3. 学会等名 2022 年度 (第 62 回) 日本建築学会九州支部研究報告会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川島聖
2. 発表標題 水平力が作用するRC方立壁の損傷量と部材角の関係 その1 壁長800mm, ダブル配筋の実験方法及び実験結果
3. 学会等名 2021年度 第61回 日本建築学会九州支部 研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹田昂輔
2. 発表標題 水平力が作用するRC方立壁の損傷量と部材角の関係 その2 DNNモデルを用いた損傷量の画像測定
3. 学会等名 2021年度 第61回 日本建築学会九州支部 研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jang Subhin
2. 発表標題 シングル配筋されたRC方立壁の地震時損傷に関する実験的研究
3. 学会等名 2022年度 第62回 日本建築学会九州支部 研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 JANG Subhin
2. 発表標題 RC 方立壁の地震時損傷の画像測定に関する基礎的研究 その 1 実験方法及び実験結果
3. 学会等名 2023年度日本建築学会大会（近畿）学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹田 昂輔
2. 発表標題 RC方立壁の地震時損傷の画像測定に関する基礎的研究 その2 せん断スパン比の相違が損傷量に与える影響
3. 学会等名 2023年度日本建築学会大会（近畿）学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉岡 智和
2. 発表標題 RC方立壁の地震時損傷の画像測定に関する基礎的研究 その3 RC方立壁の地震時損傷検出器の生成と検出精度
3. 学会等名 2023年度日本建築学会大会（近畿）学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 JANG Subhin
2. 発表標題 せん断スパン比によるRC方立壁の地震時損傷量の変化に関する実験的研究
3. 学会等名 2023年度 第63回 日本建築学会九州支部 研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 西村優希
2. 発表標題 入力画像の拡大と重複検出を併用した学習済みDeep Neural Networkによるひび割れ検出精度の向上方法の提案
3. 学会等名 2023年度 第63回 日本建築学会九州支部 研究発表会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織			
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)		備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関