

研究助成実施報告書

助成実施年度	2019 年度
研究課題（タイトル）	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
研究者名※	吉岡 智和
所属組織※	九州大学大学院 芸術工学研究院 准教授
研究種別	研究助成
研究分野	建築技術
助成金額	120 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

() は、報告書提出時所属先。

大林財団 2019 年度研究助成実施報告書

所属機関名

九州大学大学院

申請者氏名

吉岡智和

研究課題	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
<p>(概要) 大地震で被災した共同住宅の早期復旧支援のため、専門家に代わり架構の地震応答を推測する AI の開発の一環として、畳込みニューラルネットワークモデルを用いた深層学習により生成した識別器により RC 方立壁の被害写真から損傷度を判別し、その損傷度から RC 方立壁が経験した最大変形角を予測する手法を提案した。提案した予測法の妥当性を検討するため、実大 RC 方立壁の水平加力実験を行い経験変形角毎の壁面の損傷写真を収集し、比較検証を行った。その結果、収集した損傷写真を用い提案した予測法により、RC 方立壁の損傷度、及び変形角を推測したところ、実験結果を概ね評価できることを確認した。</p>	

1. 研究の目的 (注) 必要なページ数をご使用ください。

大地震により被災した区分所有された共同住宅（以下、マンション）の住民への専門家の不足による迅速な復旧の可否判定情報の提供の遅れが、その修復工事を遅らせる要因となっている。震災時に不足する専門家の代わりに、被災現場で被害を視認し、その被害の大きさを計り、それから架構が経験した地震応答の大きさを推定する AI の開発は急務である。本研究では、その開発の一環として、マンションの廊下、バルコニー側に配置され、大きな地震被害が生じやすい RC 非構造壁（RC 方立壁）に着目し、その被害写真から損傷度を識別し、損傷度から RC 方立壁が経験した最大変形角を推測する手法（図 1.1）を提案した。

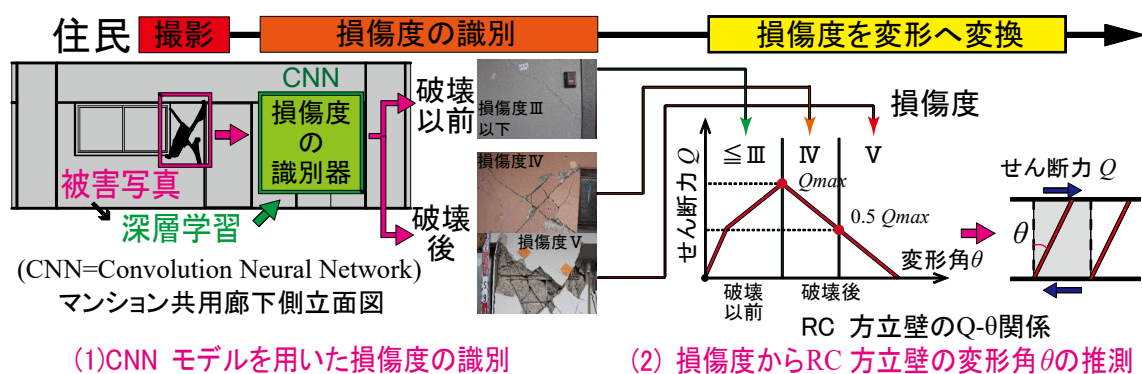


図 1.1 AI を用いた RC 方立壁の経験変形角の推測方法

研究方法として、実大 RC 方立壁の地震時挙動を模擬する水平加力実験を行い、経験変形角毎の損傷写真を収集した。収集損傷写真から、畳込みニューラルネットワークモデルを利用し深層学習により生成した損傷度識別器を用い RC 方立壁の損傷度を判別し、その損傷度を荷重変形骨格曲線の計算値に適用することで、RC 方立壁の経験変形角の予測を試み、実験結果と比較し妥当性を確認した。

2.1 実験方法

2.1.1 試験体

実験に使用した試験体の形状寸法及び配筋を図 2.1 に、全景を写真 2.1 に示す。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とし、壁厚さ 150mm、壁高さ 800mm、壁長さ 800mm とした。コンクリートには普通コンクリート ($F_c=24\text{N/mm}^2$) を用いた。壁筋として縦筋、横筋ともに D10 (SD295A) を 150mm 間隔でダブルに配筋し、開口補強筋として 2-D13 (SD295A) を設けた。使用したコンクリート、鉄筋の材料試験結果を表 2.1 に示す。

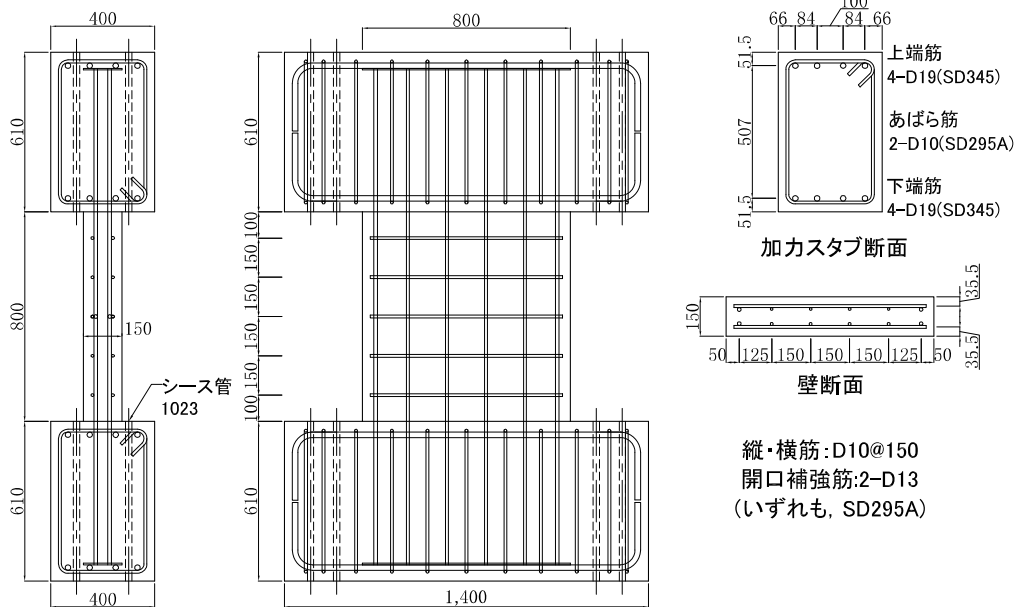


図 2.1 試験体の形状寸法及び配筋

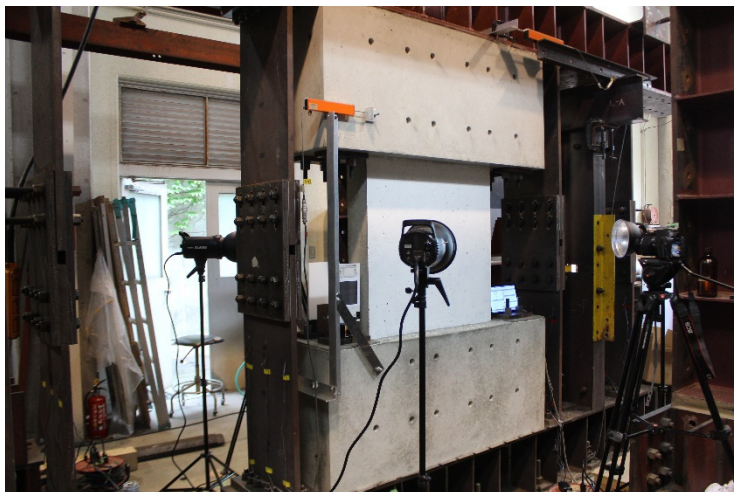


写真 2.1 試験体の全景

2.1.2 加力方法

実験に使用した加力装置を図 2.2 に示す。RC 方立壁の地震時挙動を模擬するため、試験体を加力フレームに固定し、上加力桁に 750kN アクチュエータにより水平力を加力した。鋼製柱 1, 4 により加力中の上下加力桁の平行を維持し、鋼製柱 2,3 により実際の方立壁と同様に剛体回転による伸張を拘束し圧縮軸力が導入されるように企図した。壁の変形角が $R=\pm 1/400$, $\pm 1/200$ (せん断破壊に伴い $+1/160$, $-1/133$)

表 2.1 材料の強度試験結果

使用部位	呼び強度 (N/mm ²)	材齢 (日)	単位体積重量 (kN/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
コンクリート	24	22	2.23	28.1	27.4
使用部位	径	材質	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
縦・横筋	D10	SD295A	366	484	178
端部補強筋	D13		343	468	182

に増加), $\pm 1/100$, $\pm 1/50\text{rad}$.×各1回となるように, 正負交番漸増加力を行った。

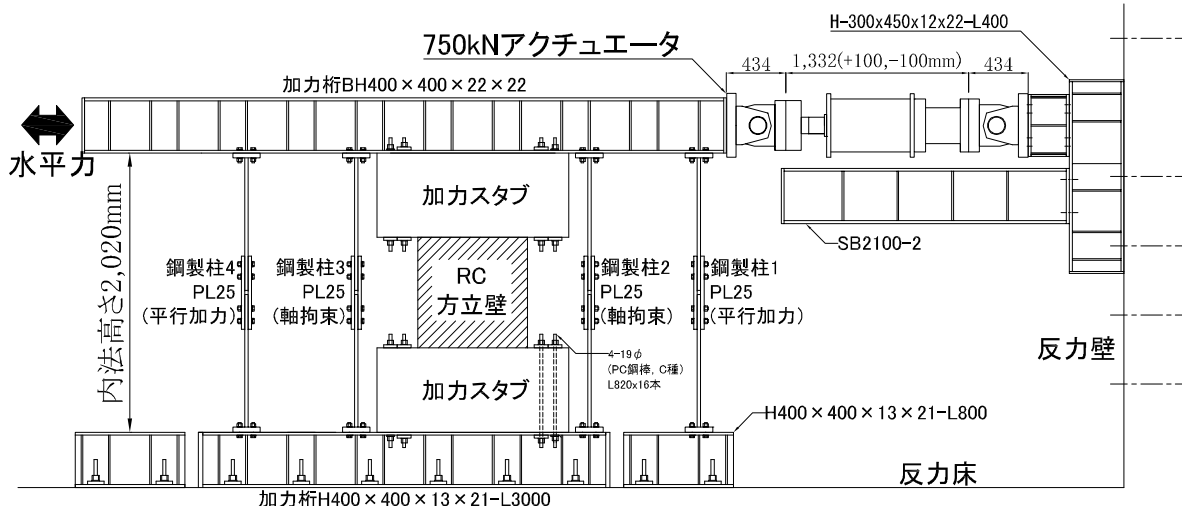


図 2.2 加力装置

2.1.3 計測方法

計測した物理量は, 水平力, 層間変位, 壁水平変位, 加力桁鋼製柱の軸力とした。鋼製梁の軸力はひずみゲージにより計測したひずみに, 事前に計測した荷重変換係数を乗じ求めた。また, 壁水平変位 0~8mm の範囲では 0.5mm 間隔で, 8~16mm の範囲では 2mm 間隔で, 両壁面上に生じる損傷をデジタルカメラ (撮影範囲: 幅約 1500mm×高さ約 1000mm を 6000×4000pixel で撮影し, 1pixel 当り約 0.25mm の精度) で撮影した。各サイクル除荷時にも同様に壁面損傷を撮影するとともに, 壁高の半分位置を横切るせん断ひび割れの残留ひび割れ幅をクラックスケールにより目視で計測した。

2.2 実験結果

実験結果として, 壁せん断力 Q_w と壁変形角 R_w の関係を図 2.3 に, 実験結果一覧を表 2.2 に示す。加えて, 壁に作用する変動軸力 N_w と壁変形角 R_w の関係を図 2.4 に, 第 1 サイクル ($R=\pm 1/800\text{rad}$.) における鋼製柱 1~4 に生じる軸力と壁変形角 R_w の関係を図 2.5 に示す。図 2.4 に示した壁の軸力は正の値が圧縮軸力, 負の値が引張軸力を示した。他方, 図 2.5 では図 2.4 とは軸力の正負を逆転 (引張軸力を正) して表示している。ここで, 壁せん断力 Q_w は, 加力時に計測した水平力より加力フレームの負担せん断力 (事前計測した水平剛性×層間変位) を除いた値とし, 壁変形角 R_w は試験体の上下スタブ間の水平変位差を壁高 800mm で除した値とした。

図 2.3, 表 2.2 に示すように, $R=\pm 1/800\text{rad}$. サイクル加力途中にせん断ひび割れが生じ, $R=\pm 1/400\text{rad}$. サイクル加力時にせん断破壊が生じ, 負担するせん断力が大きく減少するとともに変形角が増加した。また, せん断ひび割れ強度, 及びせん断終局強度の実験値は計算値を超過する結果 (計算値に対する実験値の比率 1.48~1.92) となった。また, 壁に作用する変動軸力は, せん断破壊が生じるまでの加力サイクルでは圧縮軸力となっており, 正負の最大せん断力時の軸力比は 0.14, 0.11 となった。なお, せん断破壊後では壁に作用する変動軸力が引張軸力に転じているが, これは壁の軸力支持能力が減少し水平加力時に軸縮みが生じることに起因している。また, 壁に作用する変動軸力が正加力時に比較し負加力時に小さくなり, 負加力時のせん断力の最大値が正加力時のそれに対し 13%減少した。これは, 図 2.5 に示すように, 軸拘束のため設けた鋼製柱 2 (SC2) に生じる引張軸力が鋼製柱 3 (SC3) に比較し小さくなっており, 鋼製柱 2 を固定した下加力桁の浮き上がり発生し, 鉛直方向の拘束が不十分であったことが要因と考えられる。

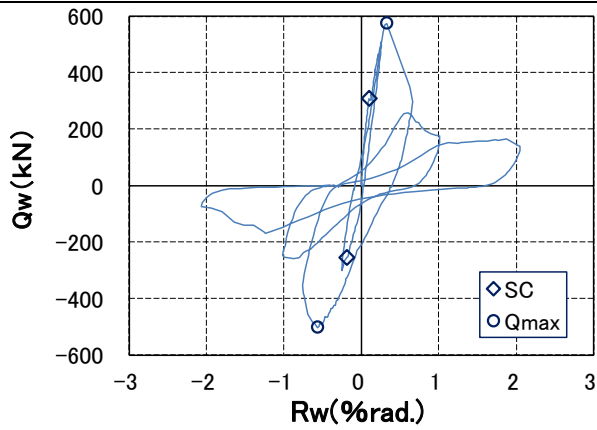


図 2.3 Qw-Rw の関係

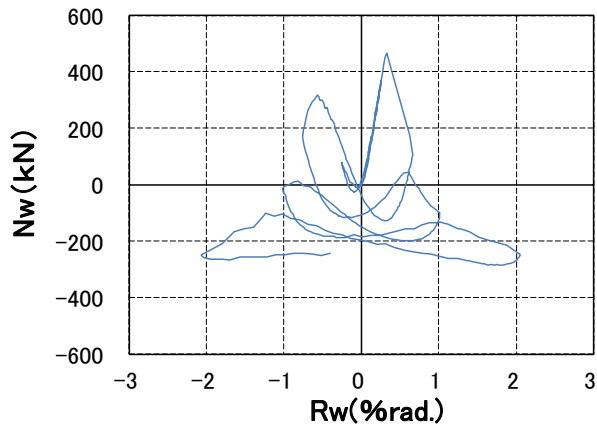


図 2.4 Nw-Rw の関係

表 2.2 実験結果一覧

現象	加力方向	Qw 実験値 (kN)	Qw 計算値 (kN)	実験値 / 計算値	Rw (%rad)	Nw (kN)
せん断ひび割れ SC	正	308	160	1.92	0.100	131
	負	-255	-138	1.85	-0.190	43.2
最大荷重 Qmax	正	574	351	1.63	0.333	467
	負	-502	-339	1.48	-0.563	319

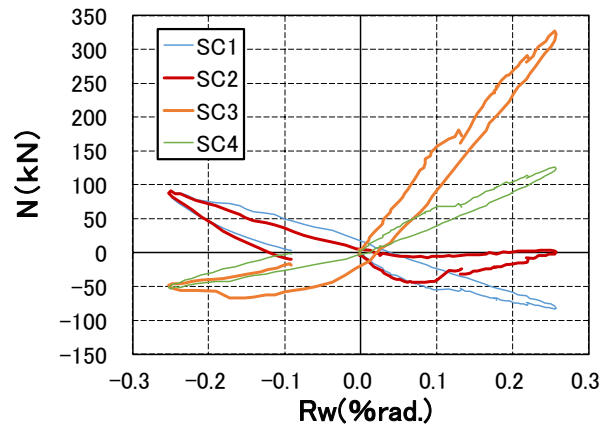


図 2.5 鋼製柱の軸力 N-Rw の関係

2.4 損傷写真から RC 方立壁の経験変形角を予測する方法とその妥当性の検討

RC 方立壁のせん断破壊直前から変形角 $R=\pm 1/50rd.$ に至るまでの壁面損傷写真から、RC 方立壁の経験変形角の予測法を提案し、前述した実験結果と比較しその妥当性を確認した。予測法では、実験時に撮影した壁面の損傷写真を深層学習により学習させた損傷度識別器¹⁾(図 2.6)により損傷度を識別し、識別した損傷度から RC 方立壁のせん断力と変形角の関係の骨格曲線²⁾を用い経験変形角に変換した。

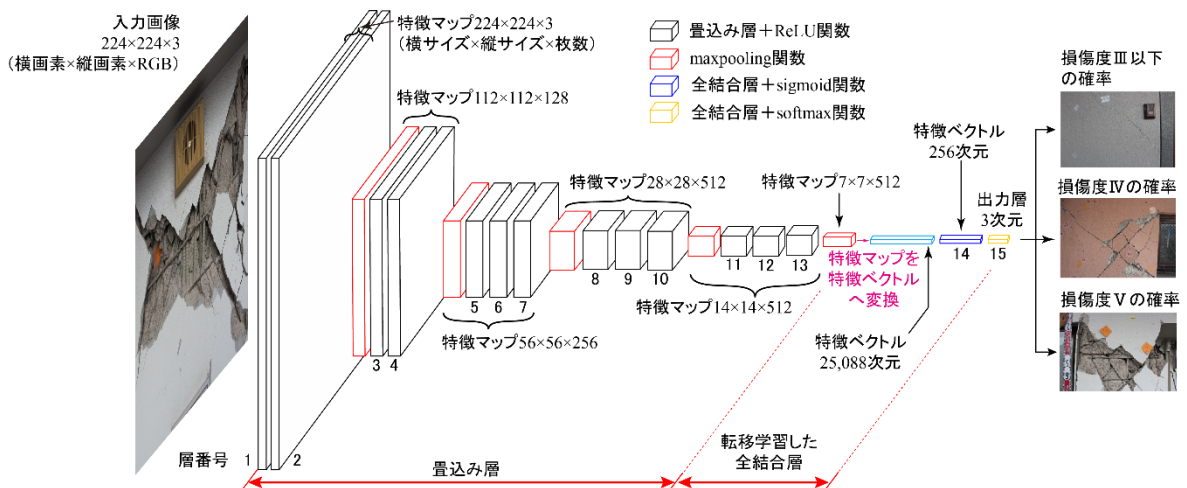


図 2.6 RC 方立壁の損傷度識別器に用いた畳込みニューラルネットワーク (CNN) モデル¹⁾

RC 方立壁の損傷度識別器¹⁾として、事前学習済み VGG16 の畳込みフィルタと重み行列を初期値とし、訓練写真を用いて再調整を行うことで、より精度の高い識別器の生成が見込まれるファインチュー

ニングを行い、筆者が生成したものを利用した(図 2.6)。生成の際に、新規追加した全結合層の重み行列を再度学習させる転移学習も行っている。識別器の訓練、検証に用いた RC 方立壁の被害写真は、熊本地震で被災した SRC 造マンション 5 棟の調査写真(訓練写真 2879 枚、検証写真 415 枚)より抽出した。本識別器は、RC 方立壁の被害写真を損傷度 III 以下、IV、V の 3 つに区別でき、その正解率は 91% となっている。なお、RC 方立壁の損傷度は、文献 3 のせん断部材の損傷度に準拠し識別した。

表 2.2 に壁面損傷写真の一例を、図 2.7 に荷重変形関係の実験値と計算値の比較及び損傷度から経験変形角の予測方法を、表 2.3 に損傷度の観測値と判別値の比較を示す。なお、表中の損傷度 3 は損傷度 III 以下を示し、損傷度 IV はせん断破壊後に最大耐力の 50% を保持している範囲と仮定した。

表 2.2 壁面損傷写真の一例

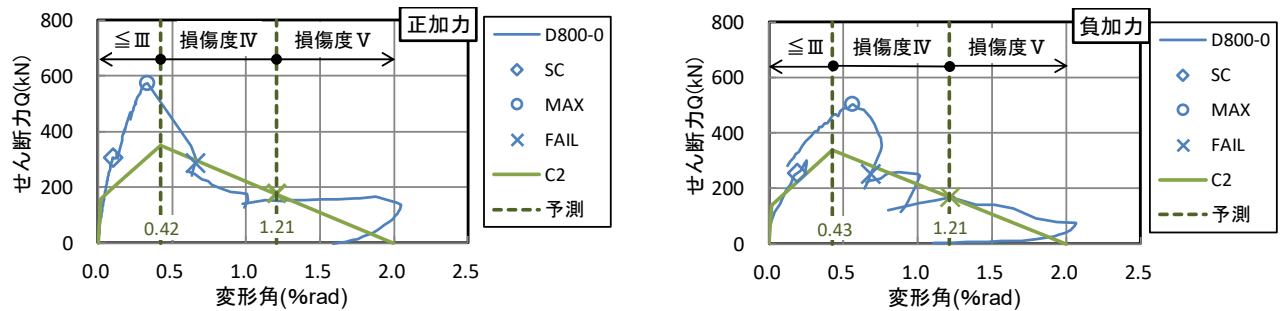
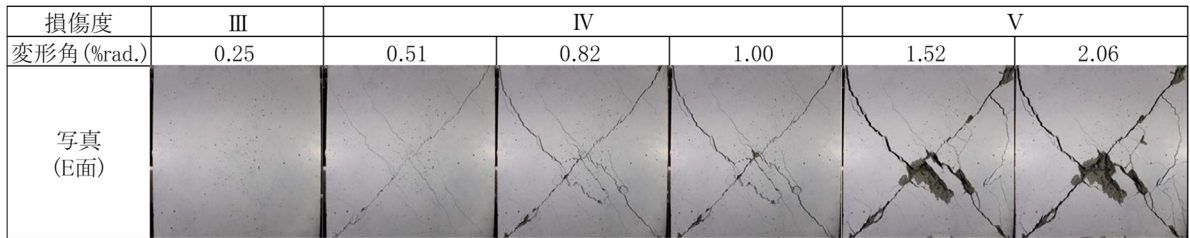


図 2.7 荷重変形包絡線の実験値と計算値²⁾の比較

表 2.3 損傷度、及び変形角の実験値と判別値、予測値の比較

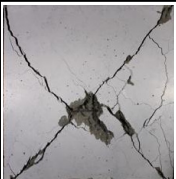
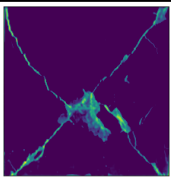
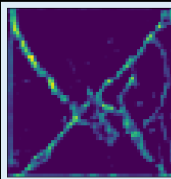
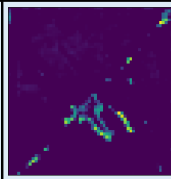
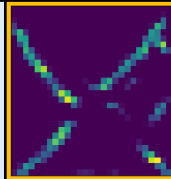
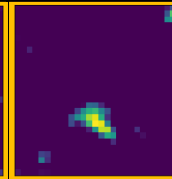
加力	方法	壁変位 (mm)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	10	12	14	16	
正	観測	損傷度	3	3	-	-	-	-	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	判別E		3	3	-	-	-	-	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5
	判別W		3	3	-	-	-	-	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
負	観測	損傷度	3	4(*)	4(*)	4(*)	4(*)	4(*)	-	-	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5
	判別E		3	4	4	4	4	4	-	-	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5
	判別W		3	4	4	4	4	4	-	-	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5
正	観測	変形角 (%rad.)	0.26	0.33	-	-	-	-	0.63	0.70	0.77	0.83	0.90	0.96	1.00	1.28	1.51	1.77	2.05	
	予測E		0.42%rad. ≤ R < 1.21%rad.													R ≥ 1.21%rad.				
	予測W		0.42%rad. ≤ R < 1.21%rad.																	
負	観測	変形角 (%rad.)	0.25	0.31	0.37	0.45	0.51	0.56	-	-	0.75	0.82	0.88	0.94	1.00	1.25	1.52	1.8	2.06	
	予測E		0.43%rad. ≤ R < 1.21%rad.													R ≥ 1.21%rad.				
	予測W		0.43%rad. ≤ R < 1.21%rad.																	

*壁変位 2.5~4.5mm の負加力時では、R=+1/200rad. 正加力時にせん断破壊が生じ、幅 3mm を超えるせん断ひび割れが生じたままとなったので、損傷度の観測値を損傷度 IV と判断した。

損傷度の観測値と判別値の比較を行うと、正加力時の壁変位 5.5~8.0mm では、せん断力が最大耐力 50% 未満となり損傷度 V の観測値に対し、判別値はいずれの場合も損傷度 IV と過小評価となった。なお、壁変位 10~16mm では、白色ペンキで塗装した壁面(判別 E)の写真に基づく損傷度の判別値は観測値に一致し、打ち放しの壁面(判別 W)に基づく損傷度の判別値は観測値を過小評価した。一方、負加力時では、損傷度の観測値と判別値は概ね一致した。また、図 2.7 に示した RC 方立壁の荷重変形骨格曲

線の計算値²⁾から予測した壁変形角の範囲は実験値を概ね包含しており、RC 方立壁の損傷写真からその経験変形角の範囲を概ね予測可能であった。加えて、識別器が損傷写真の損傷度を識別する際に抽出する特徴マップ（特徴量）を表 2.4 に示す。識別器（CNN モデル）は、畳込み層でひび割れとコンクリート剥落部分をそれぞれ特徴量として抽出し、損傷度を分類していることが把握できる。

表 2.4 損傷度識別器の抽出した損傷写真の特徴マップ（特徴量）

畳込み層	入力	第1層	第5層		第10層	
画像						
特徴の抽出	—	損傷全般	損傷全般	コンクリート剥落	ひび割れ	コンクリート剥落

参考文献

- 1)吉岡智和, 深層学習による被害写真を用いた RC 方立壁の損傷度識別器の生成, 日本建築学会技術報告集, 第 26 巻, 第 64 号, pp.1252-1257, DOI <https://doi.org/10.3130/aijt.26.1252>, 2020.10
- 2)錦戸ほのか, 徳重貴寿, 吉岡智和, 地震水平力が作用する RC 方立て壁の荷重変形曲線評価法の比較研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 分冊, pp.461-462, 2018.09.
- 3)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

3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

実大 RC 方立壁の水平加力実験を実施し、経験変形角毎の壁面損傷写真を収集した。その上で、RC 方立壁のせん断破壊直前から変形角 $R=\pm 1/50rd$ に至るまでの壁面損傷写真から、RC 方立壁の経験変形角の予測を試みた。予測法として、深層学習により生成した損傷度識別器により実験時に撮影した壁面の損傷写真の損傷度を識別し、識別した損傷度から RC 方立壁のせん断力と変形角の関係の骨格曲線を用い経験変形角に変換した。本研究の範囲において、以下の知見が得られた。

- 1)正加力後の負加力時の損傷写真に基づく損傷度の判別値は観測値と概ね一致した。一方、正加力時、又は打ち放し面（W 面）の損傷写真に基づく損傷度の判別値は、観測値の一部を過小評価した。
- 2)損傷写真に基づく損傷度の判別値より RC 方立壁の荷重変形骨格曲線の計算値から予測した変形角の範囲は実験値を概ね包含し、RC 方立壁の損傷写真からその経験変形角を予測可能であった。

4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

RC 方立壁の損傷写真からその経験変形角を予測する際の精度向上のため、深層学習により生成した識別器がせん断破壊の有無を識別する際に抽出した特徴マップ（特徴量）を利用したマスク処理、最適化した閾値による二値化を行うことで、ひび割れ、コンクリート剥落領域の検出、画像計測する手法の確立を試みる。その手法で損傷写真から画像計測した RC 方立壁のひび割れ長さ、コンクリート剥落面積を、予め求めて置いた損傷量と変形角の関係を表す実験式に入力することで、経験した最大変形角を推測する手法の開発を引き続き行う。