

## 多数回繰り返し水平荷重を受けた SRC 方形柱の耐震性能と AI に基づいた評価方法

熊本大学 蔡高創

## 1.はじめに

本研究は長周期地震動 (LPGM) に焦点を当て、特に平野部で発生しやすい海溝型地震の影響を探求する。LPGM は長い周期の揺れを伴い、超高層建築物での共振現象や耐震性の劣化が懸念される。近年、RC 造や CFT などの合成造の柱と梁部材に対する多数回繰り返し載荷実験が行われ<sup>1, 2, 3)</sup>、2013 年には倉富らが MRC 荷重を受ける鋼・コンクリート合成柱材の安定限界軸力を調査した<sup>4)</sup>。しかし、鉄骨鉄筋コンクリート (SRC) 構造物の長周期地震動下での性能は未だ十分に研究されていない。本研究では LPGM による多数回繰り返し (MRC) 荷重を受ける SRC 柱の耐震性能を実験的及び解析的に詳細に調査し、耐震性の高い SRC 構造物の設計手法を開発することを目指す。この研究は SDGs の目標達成にも貢献し、地震や自然災害に強い建築物の設計に寄与することを目指す。具体的には、多数回正負交番繰り返し載荷実験を実施し、SRC 柱の耐震挙動に及ぼす荷重方法や主筋種別の影響を分析し、SRC 柱のさらなる開発に向けた AI による損傷識別器を開発しました。これらを踏まえ、大地震時の建物の安全性を高めるための残存性能評価と対策を提案する。

## 2.実験計画

## 2.1 実験体の概要

試験体の形状を図 1、試験体の一覧は表 1 に示す、異形鉄筋または PC 鋼棒を主筋に用いている、横補強筋間隔は 75mm、150mm または 300mm である。コンクリート設計基準強度  $F_c=50\text{N/mm}^2$  のコンクリートを使用し、柱断面は 250mm 角形で、1/3 片持ち SRC 柱と高層ビルの最下層を想定した RC 柱の 2 種類を用意した。試験体に用いたコンクリートの力学性能結果を表 2 に示す。柱脚から水平載荷位置までの距離は 750mm である。また、柱脚部の耐力支柱として幅 250mm、奥行き 250mm、高さ 500mm の鋼製治具を使用し、PC 鋼棒で柱に強固に接続した。実験変数は、水平荷重方法、鋼棒の種類、軸力比と鋼棒の直径である。すべての試験体のせん断スパン比はすべてまったく同じで、3.0 に設定された。この場合、柱の底部 (下部鋼製固定ブロックの上部) から水平荷重位置までの距離は 750 mm である。

## 2.2 載荷方法

試験体の加力方法は、地震時に逆対称曲げを受ける柱部材を反曲点位置で切り出した片持ち柱形式とし、材端部に水平力を加力した。反力フレームに設置した 1000kN 油圧ジャッキで正負交番の水平力を作用させた。水平力をかけるジャッキの位置は固定し、試験体の下 500mm に加力スタブを設置して多数回繰り返し載荷を行った。載荷方法は従来型繰り返し (NC) と多数回繰り返し (MRC) の 2 種類に分けられている。部材角  $R$  は、載荷点位置で計測したスタブと柱の相対水平変位をせん断スパンで除することにより算出した。

載荷装置を図 2 に示す。

表 1 試験体一覧

試験体名	軸力比	Fc (N/mm <sup>2</sup> )	せん断スパン比	載荷方法	構造種別	主筋				横補強筋		
						鉄筋種類	材質	径(mm)	本数	材質	径(mm)	間隔(mm)
RC	0.18	56	3	NC	RC	異形鉄筋	SD345	16	12	SD295	10	75
PC-N2-Pw30-NC	0.18	56	3	NC	SRC	PC鋼棒	SBPR 930/1080	12	4	SD295	10	150
SD-N2-Pw30-NC	0.18	56	3	NC	SRC	異形鉄筋	SD345	16	4	SD295	10	150
PC-N2-Pw30-MC	0.18	56	3	MRC	SRC	PC鋼棒	SBPR 930/1080	15	4	SD295	10	150
SD-N2-Pw30-MC	0.18	56	3	MRC	SRC	異形鉄筋	SD345	16	4	SD295	10	150
SDB-N2-Pw30-MC	0.18	56	3	MRC	SRC	異形鉄筋	SD345	22	4	SD295	10	150
PC-N1-Pw30-MC	0.1	56	3	MRC	SRC	PC鋼棒	SBPR 930/1080	15	4	SD295	10	150
SD-N1-Pw30-MC	0.1	56	3	MRC	SRC	異形鉄筋	SD345	16	4	SD295	10	150
PC-N2-Pw15-MC	0.18	56	3	MRC	SRC	PC鋼棒	SBPR 930/1080	15	4	SD295	10	300
SD-N2-Pw15-MC	0.18	56	3	MRC	SRC	異形鉄筋	SD345	16	4	SD295	10	300

NC: 従来型繰り返し載荷, MRC: 多数回繰り返し載荷, Fc: コンクリート 4 週圧縮強度

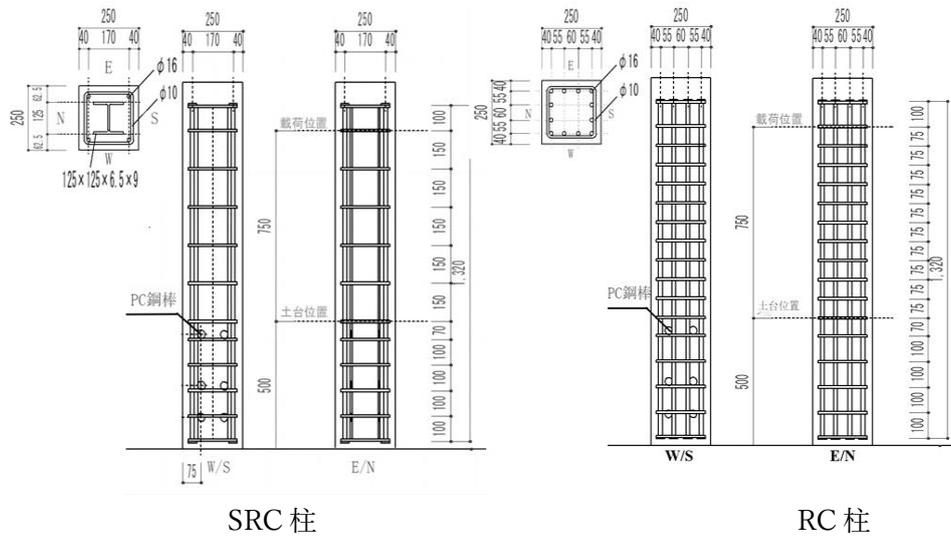


図 1 試験体の寸法図 (単位: mm)

表 2 コンクリートの 4 週強度実験結果

#	密度(kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 $\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )
1	2416.90	52.75
2	2404.44	51.48
3	2422.29	55.92
Average		53.38
#	密度(kg/m <sup>3</sup> )	割裂引張強度 $\sigma_b$ (N/mm <sup>2</sup> )
1	2374.93	3.55
2	2417.35	3.82
3	2406.48	3.5
Average		3.62

すべての試験体のせん断スパン比は 3.0 し、従来型繰り返し載荷（これを以降 NC 載荷と呼ぶ）載荷では R=0.25%, 0.5%, 0.75%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, までは各 2 回加力し、次に R=2.5%, 3.0%, 4.0% では各 1 回の正負交番繰り返し載荷を行った。多数回繰り返し載荷（これを以降 MRC 載荷と呼ぶ）では文献 5) を参照して、対象建物をを用いた地震応

答解析の結果と、既往の知見を参考に設定した。MRC 载荷では、 $R=0.25\%$ 、 $0.5\%$ 、 $0.75\%$  までは各 1 回の加力を行い、 $R=1.25\%$  を 10 回(定常ループ)、次に  $R=0.5\%$ 、 $0.75\%$ 、 $1.0\%$  を各 10 回加力(内ループ)した、その後再び  $R=1.25\%$  を 5 回、 $R=2.0\%$  を 10 回加力(定常ループ)し、更に内ループを各 5 回ずつ加力して、そして  $R=2.0\%$ 、 $3.0\%$  を各 1 回加力していった。最後に、 $R=4.0\%$  の正側加力を実施した。定常ループは、繰り返し加力による合成低下を評価する载荷セットであり、内ループは経験変形での履歴性状や剛性低下の有無を評価する载荷セットである。詳しい载荷プログラムを図 3 に示す。

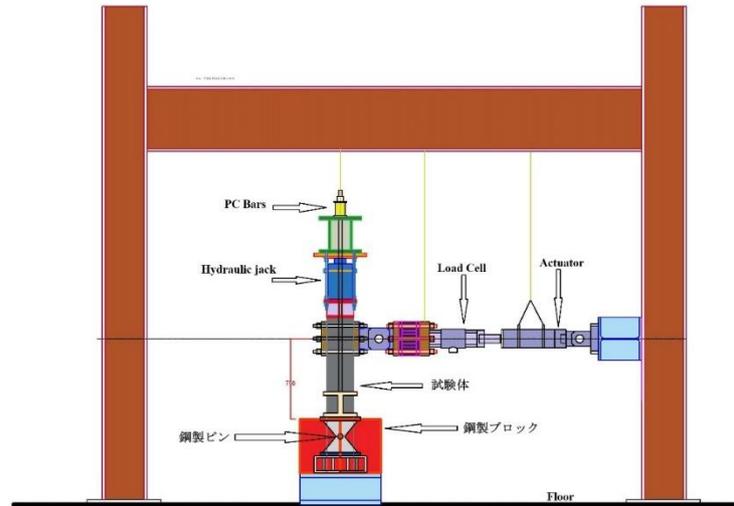
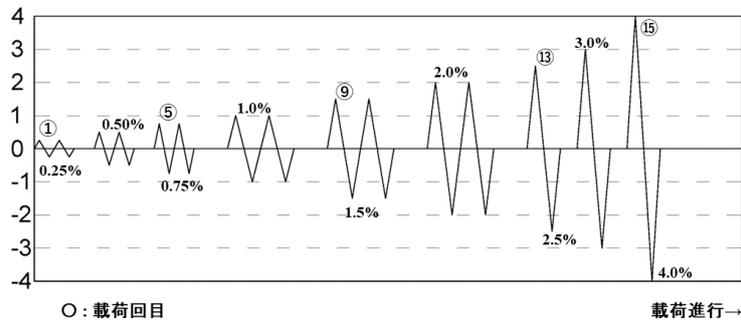


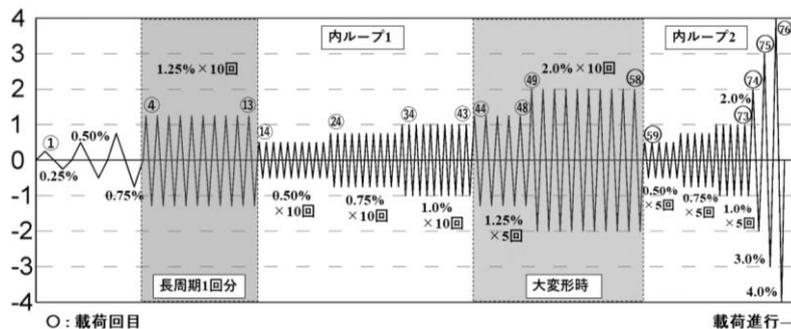
図 2 実験装置



○: 载荷回目

载荷進行→

(a)従来型繰り返し载荷(NC)



○: 载荷回目

载荷進行→

(b)多数回繰り返し载荷(MRC)

図 3 载荷プログラム

荷重点に高精度変位計を設置し、水平変位を計測し変形角度を算出する。柱の軸縮みについては、西側に柱脚から  $1.0D(=250\text{mm})$  と  $2.0D(=500\text{mm})$  の位置に変位計を設けて、載荷期間柱の鉛直変位を測定した。下の加力スタブのところで、載荷期間で加力スタブの移動を確認するため、変位計を両方向に設置した。鉄筋のひずみの計測は主筋、横補強筋それぞれにひずみゲージを貼付けて計測した。主筋には、試験体のスタブから 25mm, 150mm, 375mm, 500mm, 700mm の位置に貼付した。

### 3. 実験結果および考察

本研究報告書では、ペースが限られているため、実験結果は次のように要約された。主に、水平力と部材角の関係、破壊形状、包絡線の比較、初期剛性、およびエネルギー吸収係数が含まれる。

#### 3.1 水平力 (V) -部材角 (R) 関係

最大耐力とは、試験体 RC では  $\pm 210\text{kN}$  前後、PC-N1-Pw30-MC, SD-N1-Pw30-MC と PC-N2-Pw15-MC では  $\pm 200\text{kN}$  前後、PC-N2-Pw30-NC, PC-N2-Pw30-MC, SD-N2-Pw30-NC, SD-N2-Pw15-MC と SD-N2-Pw30-MC では、 $\pm 220\sim 230$  前後、SDB-N2-Pw30-MC では  $\pm 260\text{kN}$  前後であった。さらに最大耐力と試験体の軸力比、箍筋間隔距離、および主筋直径は正の相関関係にある。また、NC 載荷と MRC 載荷を比較すると、載荷方法による耐力の変化があまり見られなかったため、SRC 柱では長周期地震動にも十分な耐力を示すことが分かった。次に、耐力の低下を見てみると、RC 試験体に比べて、SRC 柱の方が、耐力の低下の傾きが大きく見られた。これは、SRC 柱の方が帯筋が少ないため、このような結果になったと考えられる。水平力と部材角の関係の履歴曲線を図 4 に示し、試験体の破壊の進展は図 5 に示す。

#### 3.2 荷重-変位曲線の包絡線

圧縮側の包絡線を図 4 に示す、いずれの試験体においても水平力の低下は見られたが、最大水平力後は、RC 柱とあばら筋の少ない SRC 柱を除き、すべての柱が安定した挙動を示し、良好な延性特性を示した。構造形式による違いを見てみると、主筋の面積比はそれほど変わらないが、RC 造と SRC 造では、部材角が  $R=1.5 \times 10^{-2}\text{rad}$  までは水平耐力が殆ど変わらないが、 $R=2.0 \times 10^{-2}\text{rad}$  を超えてくると SRC 造の方が RC 造よりも水平耐力が大きくなっていることが分かった。次に、軸力比による違いを見てみると、軸力比  $n=0.18$  の試験体 8 台は一般に  $R=2.5 \times 10^{-2}\text{rad}$  で最大耐力に達したが、一方、軸力比  $n=0.1$  の試験体 2 台は  $R=4.0 \times 10^{-2}\text{rad}$  の時間点で最大耐力に達した。また、載荷方法による違いを見てみると、NC と MRC の能力曲線では殆ど値が変わらなかった。ただ、耐力低下を見てみると、若干 MRC の方が耐力低下の傾きが大きかった。これは、MRC の方が NC に比べて載荷回数が多かったため、試験体の内外の破壊損傷度が大きかったと思われる。しかし、全体的に殆ど変わらないため、SRC 柱は長周期でも十分に耐力を示すことが分かった。

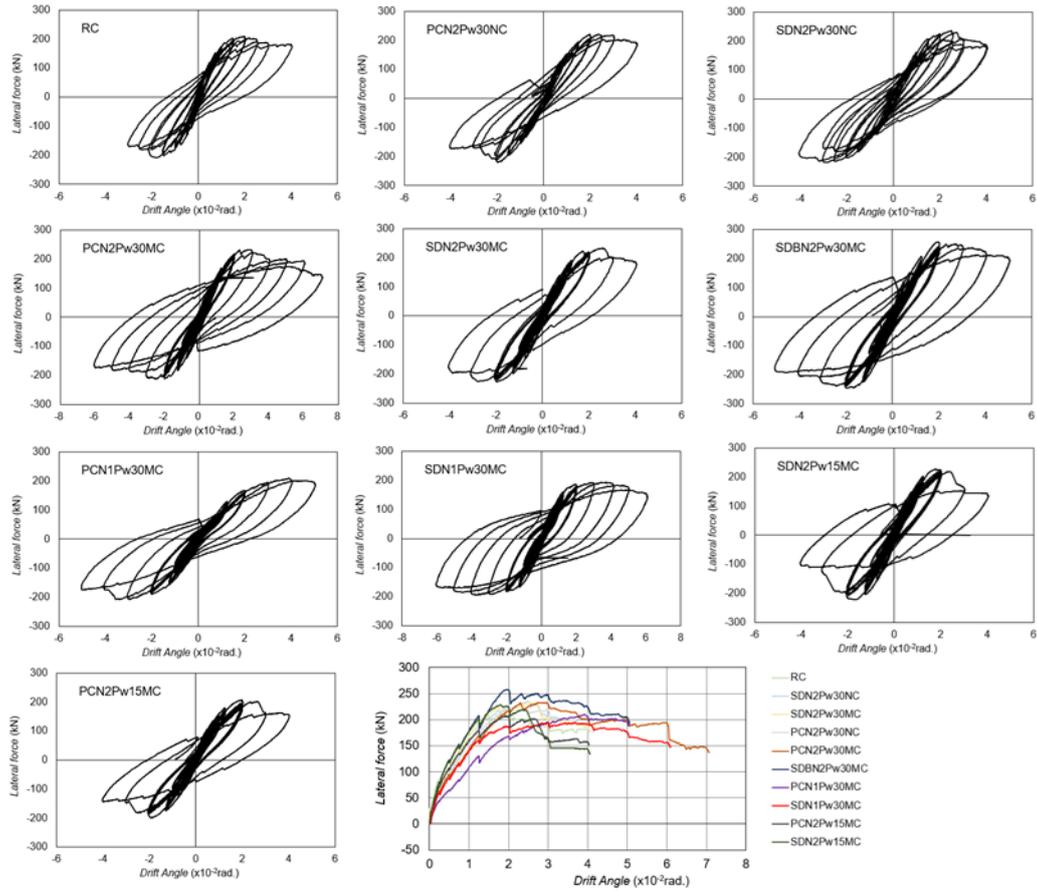


図4 水平力-部材角関係図と包絡線

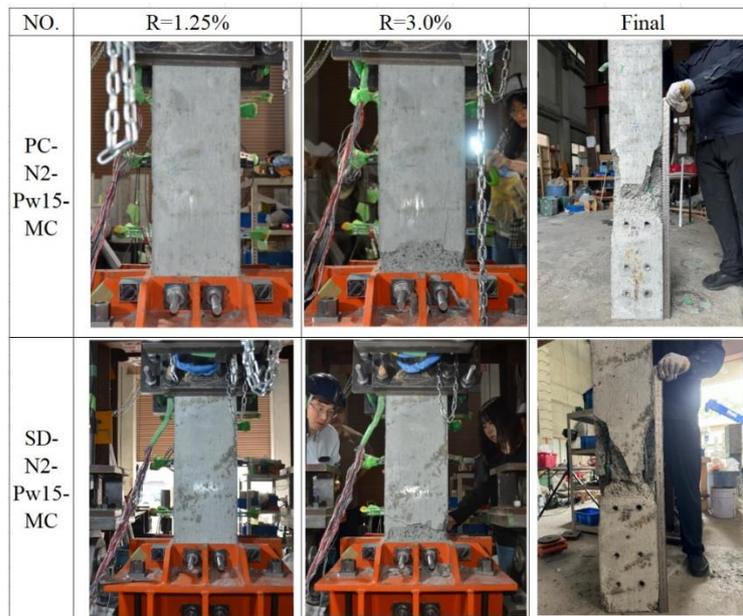


図5 試験体 PC-N2-PW15-MC と SD-N2-PW15-MC の損傷進展図

### 3.3 剛性

圧縮側の初期剛性を図6に示す。実験で得られた各試験体の部材角  $R=0.125 \times 10^{-2} \text{rad}$ .

の際の割線剛性を計算し、初期剛性とする。部材角  $R=0.125 \times 10^{-2} \text{rad}$  の時は、RC 造の方が SRC 造に比べて初期剛性が大きい結果となった。これは、RC 造の方が SRC 造と比べて、初期に引張側に異形主筋の本数が多かったため、この異形主筋の付着が柱の剛性に大きく寄与しているためと考えられる。特に、その時に SRC 中央部の H 鋼は水平荷重に大きく抵抗し始めていないと考えられる。さらに、これまでの研究では、鉄筋表面の変形特性が、鉄筋とコンクリートが水平力に共同して抵抗するための調整機構であることが示されており、このことは、PC 鋼棒の試験体に比べて、異形鉄筋を用いた試験体の大きい初期剛性によって再び証明されている。また、MRC サンプル内にあるにもかかわらず、他の試験体の値よりも大きくなっている。

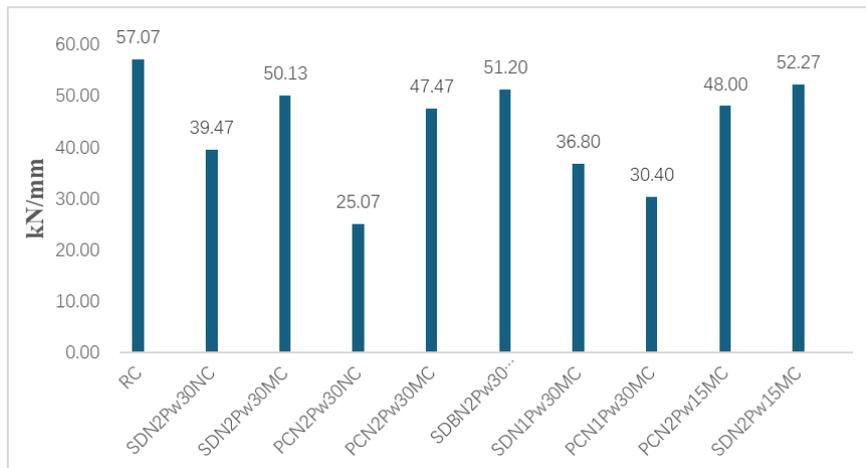


図6 初期剛性( $R=+0.125 \times 10^{-2} \text{rad}$ 時の割線剛性)

### 3.4 エネルギー吸収能力

全体的に見ると、軸力比、横補強筋比、および載荷方法等の条件が同じ場合、異形鉄筋を主筋として使用した試験体の等価粘性減衰定数は、PC 鋼棒を主筋として使用した試験体よりも高いことがわかった。これは、繰り返し荷重がかかると異形主筋表面の変形特性によりコンクリートの内部損傷が大きくなり、柱の自由変形や自由回復が妨げられるためと考えられる。図7に示すように、代表的な結果として、 $R=2.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ の載荷サイクルでは、すべての試験体が10回の繰返し載荷中に安定したエネルギー回収能力を維持していることが確認された。

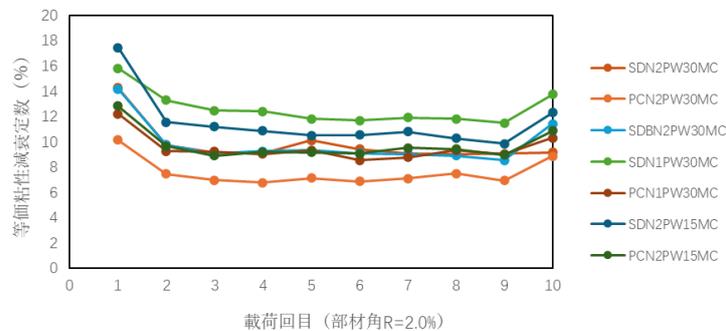


図7 繰り返し載荷による等価粘性減衰定数の劣化

#### 4. ディープラーニングによる損傷検出

広範な文献調査に基づいて、ディープラーニング技術を用いてコンクリート柱の損傷（ひび割れや剥離）を検出および分類する手法を提案する。まず、写真データセットを使用し、Labelme を用いてこれらの写真内の損傷を背景、コンクリート柱、ひび割れ、剥離の4つのカテゴリにラベル付けて分類した。次に、これらのラベル付きデータを用いてディープラーニングモデルをトレーニングする。このモデルはエンコーダとデコーダから構成され、エンコーダにはセルフアテンションモジュールとFFNモジュールを含むトランスフォーマーブロックを使用し、デコーダにはMLPを使用する。エンコーダは画像から特徴を抽出し、デコーダはこれらの特徴をアップサンプリングして、画像を先述の4つのカテゴリに正確に識別する。本研究におけるディープラーニングモデルの詳細な構造とメソッドの完全な分析アーキテクチャは図8と図9にそれぞれ示す。

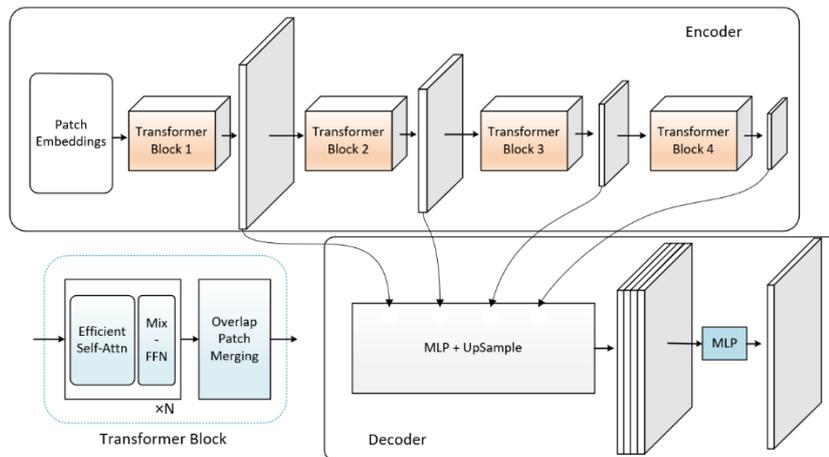


図8 本研究におけるディープラーニングモデルの詳細な構造

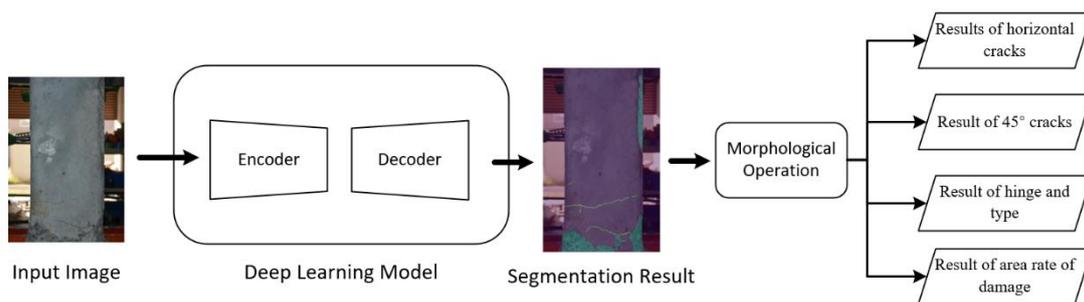


図10 メソッドの完全な分析アーキテクチャ

このモデルのセマンティックセグメンテーション結果に基づき、45度と180度のひび割れが抽出された。抽出されたひび割れと剥離は、250mmと500mmの範囲内で示される。また、ヒンジ領域の高さやひび割れの種類（F、FS、S、FB、FSB）も計算される。特に、モルフォロジー演算を使って小さなひび割れの穴や隙間を閉じる操作が適用される。各重要点について、最大横ひび割れのピクセル値が抽出され、ひび割れと剥離の輪郭を別々に計算する。

加えて、U-Net を用いて柱と水平線を識別し、特定の高さの範囲以下の損傷面積率を計算する。この手法により、損傷の面積率が求められる。これらの結果は、セマンティックセグメンテーションマップに基づいて示される。代表的結果として、試験体 PCN2Pw30NC と SDN2Pw30NC のデータセットを図 10 と図 11 に示し、PCN2Pw30NC の抽出結果を表 4 に示す。

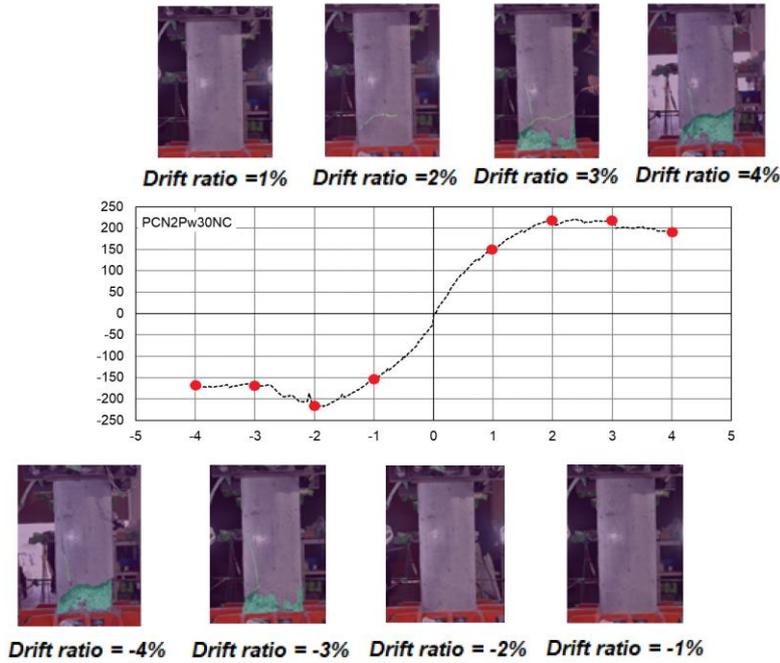


図 10 試験体 PCN2Pw30NC の抽出画像と包絡線

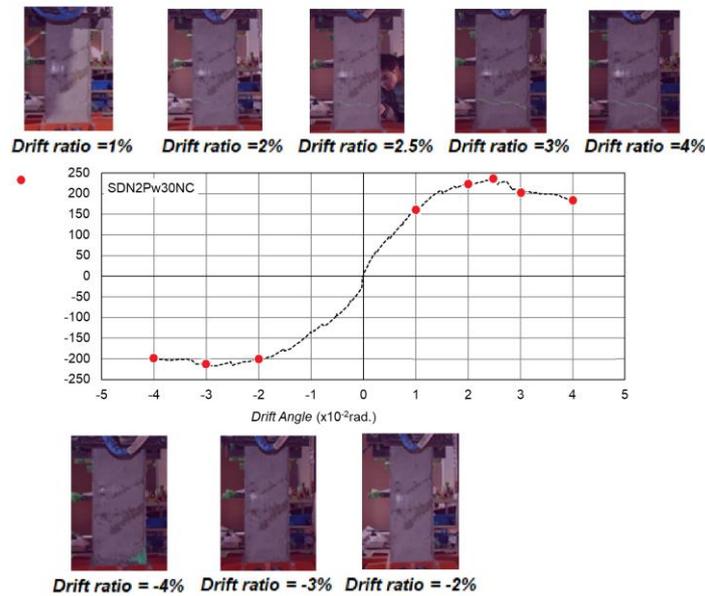


図 11 試験体 SDN2Pw30NC の抽出画像と包絡線

表 4 抽出結果の概要

Drift ratios	R=2.0×10 <sup>-2</sup> rad.	R=4.0×10 <sup>-2</sup> rad.
Extracted results		
45 Degree Cracks Detected	1	0
Horizontal Cracks Detected Top crack height(pixels)	864	697
Crack type	FS	S
Area of cracks under 250mm(pixels)	1242	983
Area of cracks under 125mm(pixels)	1242	197
Area of spalling under 250mm(pixels)	0	51906
Area of spalling under 125mm(pixels)	0	51380
Damage rate(250mm)	0.78%	32.66%
Damage rate(125mm)	1.57%	64.86%

## 5.まとめ

(1) SDB-N2-Pw30-MC は、繰り返し荷重がかかった状態でも RC 柱に比べて最大強度が約±260kN に達する。これらの最大荷重、軸力比、横補強筋比、主筋比の間には相関関係があるが、具体的な関係についてはさらなる研究が必要である。載荷方法による耐力の劣化があまり見られなかったため、特に部材角が R=1.0×10<sup>-2</sup>rad まで、SRC 柱では長周期地震動にも十分な耐力を示すことが分かった。

(2) 荷重-変位の包絡線によると、部材角が R=1.5×10<sup>-2</sup>rad までは RC 造と SRC 造の水平耐力はほとんど変わらないが、R=2.0×10<sup>-2</sup>rad を超えると、横補強筋比が小さいので、SRC 柱が RC 柱よりも水平耐力が大きくなることが分かった。若干 MRC の柱が耐力低下の傾きが大きかったが、全体的に殆ど変わらないため、SRC 柱は長周期でも十分に耐力を示すことが分かった。

(3) 初期剛性については、部材角 R=0.125×10<sup>-2</sup>rad のとき、異形鋼棒を使用し、あばら筋を多く用いた RC 柱が SRC 柱に比べて初期剛性がすこし大きかった。また、SRC 柱では、異形鉄筋の方が PC 鋼棒を用いた試験体に比べて、初期剛性が大きかった。

(4) エネルギー吸収能力に関して、異形棒鋼や PC 鋼棒を使用した柱であっても、多数回繰り返し荷重下 SRC 柱が安定したエネルギー吸収能力を持つことが確認された。

(5) ディープラーニング技術を用いて SRC 柱の損傷を検出・分類する手法を提案した。写真データを背景、コンクリート柱、ひび割れ、剥離の 4 カテゴリにラベル付けし、

エンコーダにトランスフォーマーブロック、デコーダに MLP を用いたモデルで訓練した。これにより損傷の正確な検出が可能となり、モルフォロジー演算で小さなひび割れの穴や隙間を閉じた。さらに、U-Net で損傷面積比率を計算し、ひび割れや剥離の検出精度を向上した。本研究は、開発したディープラーニング検出手法を基に、長周期地震作用下における SRC 柱の耐震性能曲線の評価手法の開発を継続的に行っている。

## 謝辞

本研究は、公益財団法人大畑財団の研究助成により実施致しました。心より感謝申し上げます。

## 研究成果

- [1] Cheng Xie, 弓削田諭, 何耘剑, 蔡高创. 多数回繰返し荷重を受ける SRC 柱の耐震性能に関する実験的研究. 日本建築学会九州支部研究報告 63 号 ROMBUNNO.269、2024 年 03 月 01 日
- [2] Gaochuang Cai, Cheng Xie, Y.He. *Performance degradation of SRC columns under multiple reversed cyclic loads induced by long-period ground motion earthquakes*, 投稿予定

## 参考文献

- 1) 福元敏之, 森田耕次, 津田恵吾, 城戸將江, & 一戸康生. (2021). 定変位振幅繰返し載荷に於けるコンクリート充填角形鋼管柱の繰返し特性. 鋼構造論文集, 28(110), 110\_73-110\_82.
- 2) 城戸將江, 福元敏之, 津田恵吾, 一戸康生, & 森田耕次. (2017). 長周期地震動に対する CFT 柱部材の保有性能に関する研究. 鋼構造論文集, 24(94), 94\_49-94\_64.
- 3) 古谷章, 北嶋圭二, 楠浩一, 田才晃, 中西三和, & 安達洋. (2015). 多数回繰返し載荷を受ける超高層 RC 造建築物の最下層柱の構造性能に関する研究. 日本建築学会構造系論文集, 80(709), 469-479.
- 4) 倉富洋, 堺純一, 田中照久, & 河本裕行. (2013). 多数回繰返し水平力を受ける鋼・コンクリート合成柱材の安定限界軸力の実験的研究. 日本建築学会構造系論文集, 78(686), 875-884.
- 5) 澤口香織, 山野辺宏治, 寺田岳彦(2012). 鉄筋コンクリート造柱梁接合部の塑性域における多数回繰返し挙動 その 1 静的載荷実験および梁の復元力モデル 日本建築学会構造系論文集, 77(677), 1123-1129.