

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02289

研究課題名(和文)ドリフト硬化型PCaRC造壁柱の開発と性能評価

研究課題名(英文) Development and Performance Evaluation of Precast Drift-Hardening Concrete Wall Columns

研究代表者

孫 玉平 (Sun, Yuping)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：00243915

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,600,000円

研究成果の概要(和文)：実験的研究より、規格降伏強度1275MPa級のウルボン筋(SBPDN筋)を壁断面の両端に集中配置されたプレキャストRC造壁柱は、軸力比0.075と0.15の軸力を受ける場合は、それぞれ層間変形角3.5%と3.0%までのドリフト硬化性(水平抵抗力が変形角の増大につれて上昇していく性能)を有することと、残留層間変形角は経験最大変形角の1/8～1/10程度までに抑制できることなどが明らかになった。

また解析的研究より、有限ばね法を用いれば、本提案PCaRC壁柱の履歴挙動を精度よく予測できることが明らかになったと同時に、壁柱の能力曲線と修復曲線の初期モデルは構築できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SBPDN筋を用いたRC壁柱のプレキャスト化により、壁板の縦筋は座屈・破断せず、せん断補強筋として働けることから、圧着PCaRC壁とほぼ同等の修復性に加え、2.5倍以上の水平耐力を持つ強靱なPCaRC壁柱を世界で初めて実現することは、学術的インパクトが高い。

本壁柱はラーメン架構に用いれば、架構高さ方向の変形モードの制御および局所的な層崩壊の回避が容易に図れる。また、本壁柱は、高い施工精度を要する定着アンカーや壁板縦筋の定着などを省くことができ、施工性に優れていることから、多様な建物への迅速な実用化が期待でき、巨大地震時の都市のレジリエンスの向上につながるため、社会的意義が極めて高い。

研究成果の概要(英文)：A novel precast concrete wall pier was proposed. The proposed wall pier consists of normal-strength concrete and ultra-high strength bars (SBPDN bars) placed in the edge zones of wall section. Through experimental and theoretical works, the following conclusions can be drawn:

- 1) The proposed drift-hardening PCaRC wall piers with axial load ratio of 0.075 and 0.15 exhibited drift hardening behavior till drift ratio of 3.0% and 3.5%, respectively, when each SBPDN rebar was housed in sheath duct with embedded depth of 25d. Besides, the peak drift of the proposed wall piers was proportional to the shear span ratio as well as the steel amount of transverse reinforcement in the wall panel, and was in reverse proportion to the axial load ratio.
- 2) Utilizing finite spring method, the hysteretic loops can be accurately predicted till large drift, and the effect of bond slip of SBPDN rebars on the overall seismic behavior of the proposed wall piers could be reliably evaluated.

研究分野：鉄筋コンクリート構造学

キーワード：PCaRC壁柱 ドリフト硬化性 残留変形角 修復性 能力曲線

1. 研究開始当初の背景

建物の耐震工学の基本理念はこれまでは“**靱性構造**”と“**人命保護**”に置かれている。すなわち、想定する設計地震動(再現周期約500年の地震動)に対して、建物に十分な粘りを確保させることにより、倒壊を防ぎ、人命を守る。一方、靱性型建物のなかには、近年の巨大地震動によって、継続使用または修復が困難ほどの大きな被害を受ける建物は多数見られた(写真1)。このような建物は地震後の都市の機能回復を妨げ、大きな社会問題となった。

南海トラフ地震のような巨大地震動が差し迫っているなか、巨大地震後の都市のレジリエンス(機能回復力)および経済活動と日常生活の復旧の観点から、人命保護・損傷抑制・機能回復の性能を併せ持つ建物を開発・実用することは、学術的な重要性和緊急性が高い。

また、近年の深刻な地球環境問題の観点から、環境負荷の軽減に対して建物の長寿命化の意義が認識されるなか、高ドリフト硬化性(高耐震性、人命保護)と高修復性(損傷制御・機能回復)を併せ持つ新しいRC造建物の開発・実用は喫緊の課題と言える。



兵庫県南部地震(1995年)



四川大地震(2008年)

写真1 靱性型建物の被災例
(申請者調査・撮影)

2. 研究の目的

本研究では、上述した学術的背景を踏まえ、降伏点応力が1275MPa級のウルボン筋をPCaRC造壁柱(柱型のない耐力壁)断面の両端に集中配置することによって、高ドリフト硬化性と高修復性(残留変形小)を併せ持つ新しい耐震要素を開発することを目的とする。研究項目は以下の3つである。

- 1) PCaRC壁柱の高ドリフト硬化性と高修復性の実証
- 2) ウルボン筋の端部定着詳細が壁柱の性能への影響と評価法の確立に資するデータの取得
- 3) ウルボン筋の付着すべりの影響を考慮できる、PCaRC壁柱の履歴性能の解析手法の開発・能力曲線と修復性曲線(経験最大部材角と残留部材角の関係)モデルの構築・提案

3. 研究の方法

本研究で開発するウルボン筋を用いたPCaRC壁柱の目標性能は、部材角が1/25になるまでドリフト硬化性(水平耐力が上昇し続ける特性)を有することと、部材角1/25からの除荷後残留部材角は1/200(修復確率が97%以上)以下になることの二項目である。

開発するPCaRC壁柱の低層建物から高層建物に至る多様な建物への実用を想定し、本研究では、実験と解析の両面から壁柱の耐震性能を研究する。実験研究においては、本壁柱のかなめであるウルボン筋の端部定着詳細を始め、壁柱のせん断スパン比、壁柱に加える軸力のレベル(軸力比)およびウルボン筋の配筋量を実験変数に取り、断面600(または900mm)×150mmの壁柱について、一定軸力下における繰り返し載荷実験を計画している。研究期間内に以下の研究を達成する。

- 1) PCaRC壁柱の高ドリフト硬化性と高修復性の実証
 - 1-1) 一体打ちRC壁柱とPCaRC壁柱のドリフト硬化性と修復性を比較検討(R1)
 - 1-2) せん断スパン比(1.5と2.5)、軸力比(0.07と0.15)、およびウルボン筋面積比(0.35%と0.50%)のPCaRC壁柱のドリフト硬化性と残留部材角への影響を究明(R1-R2)
- 2) ウルボン筋の端部定着詳細の影響に関する基礎データの取得
 - 2-1) 定着長さ(20dと30d)の影響に関するデータを取得(R1)
 - 2-2) 定着方式(機械式定着、全長ねじ切り定着)の影響に関するデータを取得(H32-H33)
- 3) PCaRC壁柱の繰り返し履歴性能の解析手法の開発(R1R3)
- 4) PCaRC壁柱の能力曲線(水平力-部材角関係)と修復性曲線モデルの構築・提案(R1-R3)

4. 研究成果

本研究計画の各年度で行われた実験および解析的研究の成果を以下にまとめる。

研究の初年度にあたる2019年度では、計画通りに、壁柱のせん断スパン比、壁柱に加える軸力の大きさ(軸力比)、ウルボン筋の配置形式(平行型と山形)および壁柱の打ち方(一体打ちとプレキャスト)を実験変数に取り、計8体の試験体を作成し、一定軸力下における繰り返し載荷実験を行った。また、層間変形角3.0%以上の大変形域ではウルボン筋束の局部座屈が壁柱の

変形能力を支配するという既往の実験結果を踏まえ、本提案壁柱の性能評価モデルに欠かせない、ウルボン筋の局部座屈性状に関する基礎データを取得するために、壁柱断面の圧縮域を模擬した試験体（6体）について中心圧縮試験を行った。それらの実験の結果より、以下のような知見を得た。

- 1) 本提案 PCaRC 壁柱は、層間変形角が 2.5%まで一体打ちの壁柱と同等なドリフト硬化性と修復性を有する。
- 2) 壁板に均等配置する縦筋を上下梁のなかへ定着させなければ、計算上せん断破壊が先行する、せん断スパン比 1.5 の壁柱はせん断破壊を回避でき、層間変形角 3.5%までのドリフト硬化性を示せる。
- 3) ウルボン筋束のしっかりした端部定着は PCaRC 壁柱が層間変形角 2.5%以上のドリフト硬化性を有する必要条件である。
- 4) ウルボン筋の降伏時ひずみが大きいことから、それを拘束するフープ筋の間隔がウルボン筋直径の 4 倍と小さい場合でも、ウルボン筋束は弾性領域で局部座屈する傾向にある。

2020 年度では、ウルボン筋の端部定着詳細（転造ねじとアンカー定着）壁柱のせん断スパン比、壁に作用する軸力の大きさ、およびシース管の直径と埋め込み深さを実験変数に取り、ウルボン筋を用いた RC 造プレキャスト壁柱と一体打ち壁柱を計 8 体製作し、それらの試験体に一定軸力下における繰り返し曲げせん断実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 端部がアンカーで定着されたウルボン筋束（外周シース管）の埋め込み深さがシース管外径の 5 倍程度であれば、せん断スパン比 1.5 のプレキャスト壁柱は部材角 3.5%まで一体打ち壁柱と同等なドリフト硬化性（耐力が水平変位の増加に伴い上昇し続ける特性）を有すると同時に、部材角 5.0%まで水平耐力の低下が始どなく、非常に優れた耐震性能を示した。一方、端部が転造ねじで定着した場合の壁柱は部材角 3.0%までのドリフト硬化性を示し、アンカー定着よりやや低かった。また、せん断スパン比 2.0 のプレキャスト壁柱は部材角 3.5%まで耐力が上昇し続け、優れたドリフト硬化性を示した。
- 2) ウルボン筋束の埋め込み深さが浅い場合、部材角が 1.5%～2.5%までドリフト硬化性を示したが、それ以後の大変形域においては、ウルボン筋束とシース管が一体となって抜け出し始め、ウルボン筋のひずみが引張方向に頭打ちとなったため、プレキャスト壁柱の水平抵抗力が緩やかに低下した。
- 3) ウルボン筋束を格納するシース管の外径を大きくすることより、ウルボン筋の端部をナットなどアンカー定着したうえ、その埋め込み深さを鉄筋直径の 30 倍以上に設ければ、本提案ドリフト硬化型 PCaRC 壁柱に部材角 3.5%までのドリフト硬化性と高い修復性を確保することができる。

研究の最終年度にあたる 2021 年度では、計画通りに、壁柱におけるウルボン筋の定着詳細を実験変数に取り、4 体の試験体を作成し、一定軸力下における繰り返し載荷実験を行った。また、本壁柱の実用時に不可欠な履歴性能解析手法の開発、および能力曲線と修復性曲線の構築と提案を図るために、解析的な検討を行った。実験と解析結果より、以下のような知見が得られた。

- 1) 本提案 PCaRC 壁柱は、ウルボン筋束を構成するウルボン筋を個別に格納し、そのシース管の埋め込み深さは鉄筋径の 25 倍程度にすれば、軸力比 0.075 と 0.15 の軸力を受ける壁柱は層間変形角 3.0～3.5%までのドリフト硬化性と修復性を有する（図 1 を参照）。
- 2) 研究代表者らが提案した SBPDN 筋の付着 すべり履歴モデルと有限ばね要素法を用いれば、本壁柱の履歴挙動は限界層間変形角（履歴曲線のピーク点での変形角）まで精度よく追跡することができる（図 1 を参照）。
- 3) 本壁柱のドリフト硬化点における限界層間変形角は、壁柱のせん断スパン比および横筋比と線形比例し、軸力比と反比例する簡潔な関数で精度よく評価できる。
- 4) 本壁柱の能力曲線は直線と対数曲線関数で定式化できる。
- 5) 本壁柱の残留層間変形角は、限界層間変形角まで、経験した層間変形角と比例関係にあり、経験最大層間変形角の 1/8～1/10 程度に抑制できる。

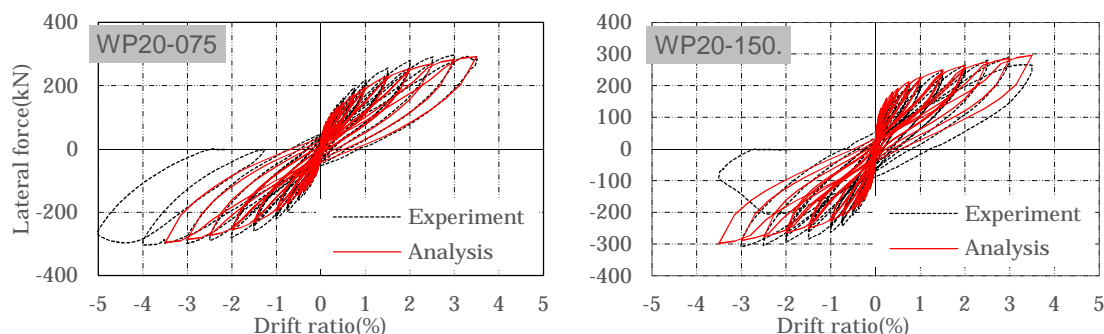


図 1 提案 PCaRC 壁柱の履歴性状の実験結果と解析結果との比較例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9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 J. Luo, T. Takeuchi, J. Zhao, and Y. Sun	4. 巻 44
2. 論文標題 Experimental study on axial behavior of confined concrete columns with SBPDN rebars	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 6頁
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 CHE Jiayu, SUN Yuping, TAKEUCHI Takashi	4. 巻 68B
2. 論文標題 SEISMIC BEHAVIOR AND BOND PERFORMANCE OF RECTANGULAR PRECAST CONCRETE WALLS REINFORCED WITH ULTRA-HIGH STRENGTH REBARS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Structural Engineering B	6. 最初と最後の頁 87～96
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijjse.68B.0_87	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 WEI Chuxuan, SUN Yuping, TAKEUCHI Takashi, CHE Jiayu	4. 巻 68B
2. 論文標題 INFLUENCE OF ANCHORAGE DETAILING ON SEISMIC BEHAVIOR OF PRECAST CONCRETE WALLS REINFORCED WITH SBPDN REBARS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Structural Engineering B	6. 最初と最後の頁 75～86
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijjse.68B.0_75	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 車佳雨, 孫玉平, 竹内崇, 魏楚軒	4. 巻 43
2. 論文標題 SBPDN鉄筋を用いたRC造プレキャスト耐力壁の耐震性能に関する研究	5. 発行年 2021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 169-174
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 魏楚軒, 孫玉平, 竹内崇, 中川貴雄	4. 巻 43
2. 論文標題 Seismic behaviors and evaluation of reinforced concrete walls reinforced by SBPDN rebars	5. 発行年 2021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 175-180
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 上田凌也, 阪中樹, 孫玉平, 竹内崇	4. 巻 43
2. 論文標題 転造ねじを有するSBPDN鉄筋の引抜耐力に及ぼすコンクリート強度の影響	5. 発行年 2021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 379-384
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 A. Zhou, Y. Sun, T. Takashi, M. Jia and P. Luo	4. 巻 1
2. 論文標題 Monotonically compressive stress-strain model of ultra-high-strength rebar considering buckling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 17WCEE	6. 最初と最後の頁 8 pages
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 魏丞瑾, 孫玉平, 竹内崇	4. 巻 42
2. 論文標題 SBPDN鉄筋を山形配筋したRC造耐力壁の耐震性能に関する研究	5. 発行年 2020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 295-300
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 Aixin Zhou, Pengjun Luo, Takeuchi Takashi, and Yuping Sun	4. 巻 1
2. 論文標題 Effects of core concrete on the buckling behavior of ultra-high strength reinforcement bars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 2019 IABSE Congress, New York	6. 最初と最後の頁 2084-2089
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 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 車佳雨、田中優輝、孫玉平、竹内崇
2. 発表標題 SBPDN鉄筋を用いたRC造プレキャスト矩形壁の耐震性能に関する研究 (その5 定着方法を改善した実験結果)
3. 学会等名 日本建築学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中優輝、車佳雨、孫玉平、竹内崇
2. 発表標題 SBPDN鉄筋を用いたRC造プレキャスト矩形壁の耐震性能に関する研究 (その4 定着方法を改善した実験計画)
3. 学会等名 日本建築学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上田凌也、孫玉平、竹内崇
2. 発表標題 グラウト内のSBPDN鉄筋の付着特性に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川貴雄, 車佳雨, 魏楚軒, 孫玉平, 竹内崇
2. 発表標題 SBPDN鉄筋を用いたRC造プレキャスト矩形壁の耐震性能に関する研究 (その1 実験概要)
3. 学会等名 日本建築学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 車佳雨, 中川貴雄, 魏楚軒, 孫玉平, 竹内崇
2. 発表標題 SBPDN鉄筋を用いたRC造プレキャスト矩形壁の耐震性能に関する研究 (その2 実験結果)
3. 学会等名 日本建築学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 魏楚軒, 車佳雨, 中川貴雄, 孫玉平, 竹内崇
2. 発表標題 SBPDN鉄筋を用いたRC造プレキャスト矩形壁の耐震性能に関する研究 (その3 解析結果)
3. 学会等名 日本建築学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川貴雄, 車佳雨, 魏丞瑾, 魏楚軒, 孫玉平, 竹内崇
2. 発表標題 SBPDN鉄筋を用いたRC造矩形壁の耐震性能に関する研究—その1 実験概要
3. 学会等名 日本建築学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 車住雨, 中川貴雄, 魏丞瑾, 魏楚軒, 孫玉平, 竹内崇
2. 発表標題 SBPND鉄筋を用いたRC造矩形壁の耐震性能に関する研究—その1 実験概要
3. 学会等名 日本建築学会年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

神戸大学鋼・コンクリート合成構造研究室 http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-sccs/
--

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
研究分担者	藤永 隆 (Fujinaga Takashi) (10304130)	神戸大学・都市安全研究センター・准教授 (14501)	
研究分担者	竹内 崇 (Takeuchi Takashi) (80624395)	神戸大学・工学研究科・助教 (14501)	

	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
研究協力者	伊藤 崇晃 (Ito Takaaki)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	魏 楚軒 (Wei Chuxuan)		
研究協力者	車 佳雨 (Xia Jiayu)		
研究協力者	魏 丞瑾 (Wei Chenjing)		

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