

鉄筋コンクリート柱の繰り返し復元力特性モデルの構築に関する研究

EC17028 杉山 風雅

1. 研究目的

これまで、鉄筋コンクリート (RC) 柱のポストピーク時の変形挙動に関する研究^{例えば, 1), 2), 3)}が進められているが、その変形挙動を精度良く簡潔に予測する方法は確立されていない。それゆえ、本研究では一定軸力下で RC 柱が一方方向繰り返し外力を受けた場合の変形挙動を予測するための復元力特性モデルを構築する。

2. 一方方向荷重実験の概要

RC 柱の繰り返し復元力特性モデルを構築するため、「荷重パターン」・「コンクリート強度」・「横拘束筋間隔」を要因とした一方方向荷重実験データを用いた。以下に、実験概要³⁾を述べる。

2.1 実験供試体

実験に用いた供試体の形状と配筋の詳細を図-1 に示す。供試体は断面 200×200mm、柱有効高さ 1,000mm、せん断スパン比 5 の曲げ破壊先行型 RC 柱である。軸方向鉄筋には D10 (SD295A) を 8 本、横拘束筋には D6 (SD295A) を柱基部 2D 区間 (D:柱幅) において間隔 (s) = 35, 50, 65, 90, 105, 120, 150mm の 7 パターンで配筋してある。柱のコンクリートの設計基準強度は 20, 40, 60MPa の 3 パターンである。

2.2 荷重方法

写真-1 に示す荷重装置により RC 柱に軸力を作用させつつ、柱頂部に水平変位を与え、荷重実験を実施した。軸力の大きさは累加軸耐力の 5 % (およそ 45.5~59.5kN) とし、軸力荷重後、後述の荷重パターンに基づき変位制御により繰り返し水平荷重を作用させた。

2.3 荷重パターン

本節では、実験で設定した荷重パターンについて述べる。図-2 に示すような 2 種類の荷重パターンを対象とした。図中の横軸は繰り返し回数、縦軸は水平変位 δ を降伏変位 δ_y で除して無次元化したものである。降伏変位 δ_y は供試体の軸方向筋が降伏 (降伏ひずみ $\epsilon_y = 2,000\mu$) した際の水平変位である。具体的な荷重パターン (変位の与え方) を以下に示す。

- 1) 低変位レベルから大变位レベルにかけての繰り返し漸増荷重 (荷重パターン 1)

変位 0 mm \rightarrow $\pm 1 \delta_y$ (1 または 2 サイクル) \rightarrow $\pm 2 \delta_y$ (1 または 2 サイクル) \rightarrow $\pm 4 \delta_y$ (2 サイクル) \rightarrow $\pm 8 \delta_y$ (1 サイクル) \rightarrow $\pm 16 \delta_y$ (1 サイクル) \rightarrow 荷重 0 kN になるまで一方方向荷重する。
- 2) 中変位レベルから大变位レベルにかけての繰り返し漸増荷重 (荷重パターン 2)

変位 0 mm \rightarrow $\pm 4 \delta_y$ (2 サイクル) \rightarrow $\pm 8 \delta_y$ (2 サイクル) \rightarrow $\pm 12 \delta_y$ (1 または 2 サイクル) \rightarrow 荷重 0 kN になるまで一方方向荷重する。

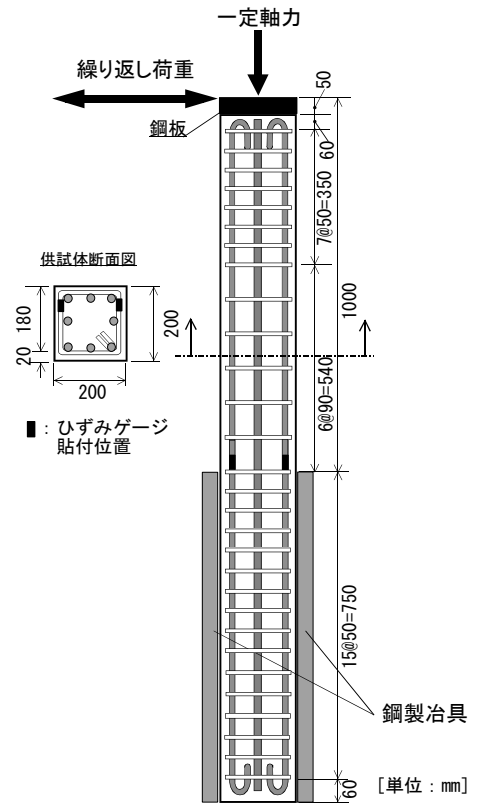


図-1 供試体配筋図



写真-1 荷重装置

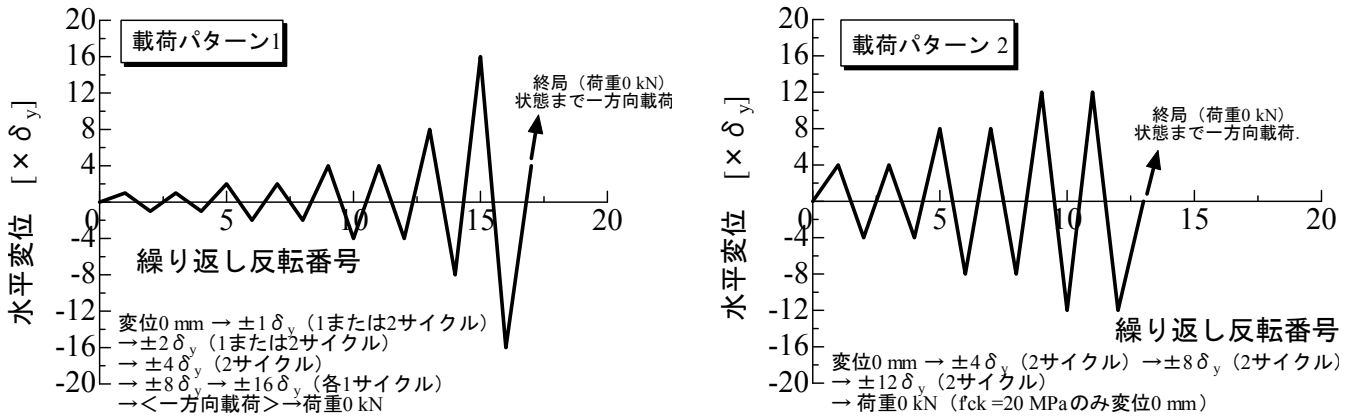


図-2 荷重パターン

3. 実験結果

図-3 および図-4 に水平荷重-水平変位曲線の一例を示す。図-3 では横拘束筋間隔が異なる曲線，図-4 ではコンクリート強度が異なる場合の曲線の比較をしている。また，それぞれの実線はパターン 1，破線はパターン 2 の曲線を示す。横拘束筋間隔の違いによる各柱の最大荷重には大きな差異は認められないが（図-3 参照），コンクリート強度が大きい場合には柱の最大荷重が大きくなる（図-4 参照）。

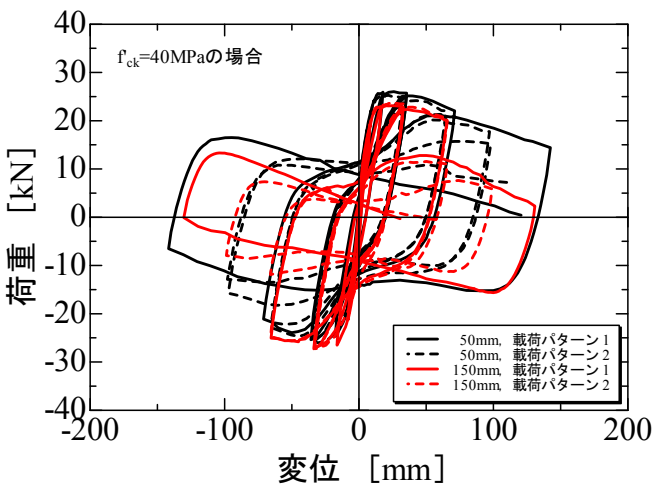


図-3 横拘束筋間隔が異なる荷重-変位曲線

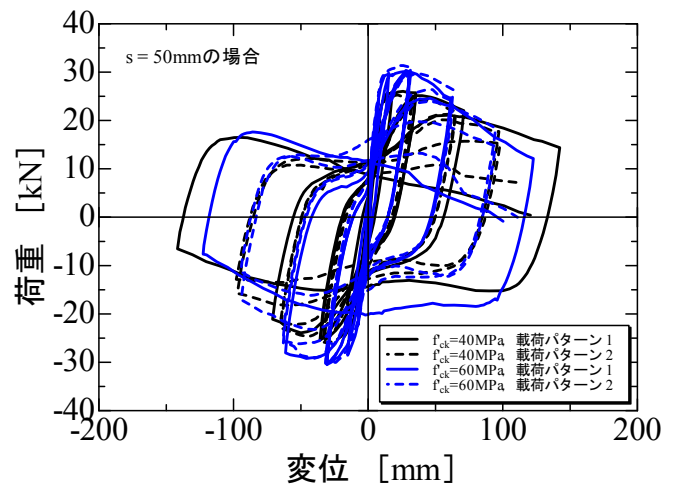


図-4 コンクリート強度が異なる荷重-変位曲線

4. 復元力特性モデルの構築

4.1 強度-変位曲線³⁾

水平荷重-水平変位曲線（例えば，図-5）を除荷点（図中の○印）と再載荷点（図中の●印）で切断し，除荷点-再載荷点間の曲線を第一象限に描いたものを強度-変位曲線（分解曲線とも称する）と定義する（図-6 参照）。例えば，図-6 中の曲線①は，図-5 中の除荷点①から再載荷点②までの曲線を除荷点①を原点として第一象限に描いたものである。加えて，強度-変位曲線群に付随する，限界曲線とヒンジ曲線を以下に説明する。

1) 限界曲線

荷重の影響（損傷）を受けていない強度-変位曲線（分解曲線）を限界曲線とする。限界曲線は分解曲線群を包絡するような曲線である。図-7 中に赤線で限界曲線の概略を示す。図中の黒線は分解曲線群の例である。

2) 塑性ヒンジ曲線

過度の繰り返し荷重を受け，RC 柱基部のコンクリートの抵抗力がなくなった状態の強度-変位曲線をヒンジ曲線と称する。図-7 中に青線でヒンジ曲線の概略を示す。ヒンジ曲線の下降部分はヒンジ勾配（荷重軸力/柱高さ）を有する直線となる。限界曲線と強度-変位曲線群の下降部分もヒンジ曲線と同じ勾配で低下する。

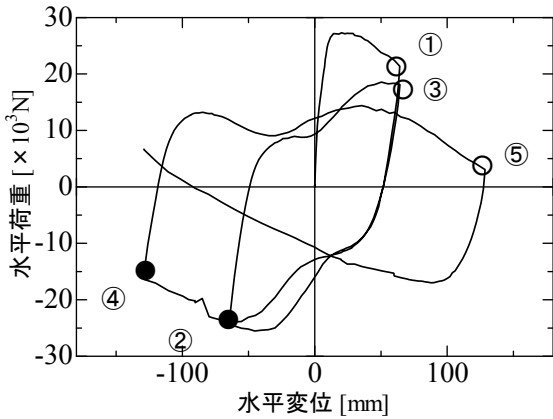


図-5 荷重-変位曲線

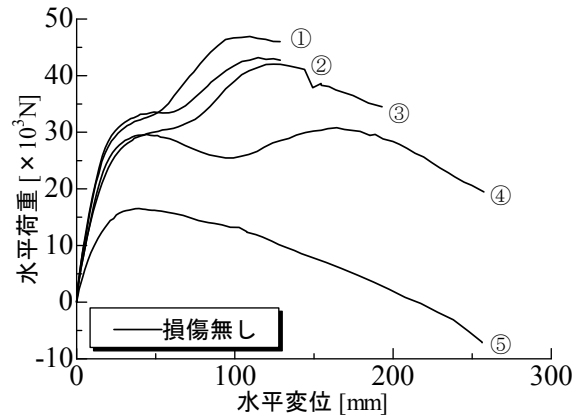


図-6 強度-変位曲線(分解曲線)

4.2 復元力特性モデルの提案

本節では、復元力特性モデルのプロセスを以下に述べる。

1) 強度-変位曲線(分解曲線)群の作成

実験から得られた荷重-変位曲線を(除荷～再載荷)曲線、(再載荷～除荷)曲線に分解し、除荷点または再載荷点を原点とし第1象限に強度-変位曲線(例えば、図-7中の曲線①および曲線②)として統合する。ここで、変位と荷重は正值とする。なお、荷重-変位曲線の初期曲線(原点から最初に除荷するまでの曲線)は強度-変位曲線群に含めない。

2) ヒンジ勾配の設定

載荷軸力を柱高さで除した値をヒンジ勾配として定める。

3) 限界曲線および塑性ヒンジ曲線の設定

分解曲線群を内包し、ヒンジ勾配で下降する曲線を限界曲線とする。塑性化した柱の耐力曲線を塑性ヒンジ曲線とする。

4) 補間法による強度-変位曲線の予測

限界曲線および分解曲線群を用いて任意の荷経路に対する強度-変位曲線を以下に説明する補間法により予測する。補間法のイメージを図-8に示す。累積吸収エネルギー、変位幅などの

状態量 E_1 、 E_3 に付随する分解曲線を図中を実線で示す。 $E_1 < E_2 < E_3$ の条件下で、任意状態量 E_2 に付随する曲線は、比例配分などの補間法により求める(図-8中の破線)。例えば、同一変位での荷重値、さらに E_1 、 E_2 、 E_3 の値を基に比例配分により補間することも一策である。

5) 予測する荷重-変位曲線の作成

上記の補間法により求めた強度-変位曲線を順次繋げることにより、予測すべき荷重-変位曲線を作成していく。除荷曲線に相当する場合には、強度-変位曲線を反転させて繋げる。

4.3 予測結果

本節では、荷重-変位曲線の面積である累積吸収エネルギー、供試体が過去に受けた最大の変位幅を状態量として強度-変位曲線の予測を試みた。図-9に累積吸収エネルギーに基づいた予測結果、図-10に変位幅に基づいた予測結果を示す。図中、実線は予測曲線、破線は実験曲線である。両状態量に基づいた予測結果とも $\pm 8 \delta_y$ 区間(図中の変位 $\pm 60\text{mm}$ 区間)までは実験値と概ね一致したが、累積吸収エネルギーによる予測結果では $\pm 16 \delta_y$ 区間(図中の $\pm 130\text{mm}$ 区間)の実験曲線と大きな差が生じた。 $-8 \delta_y$ から $+16 \delta_y$ までの再載荷曲線(変位が -60mm から 130mm までの曲線)の後半でずれが生じ、それが $\pm 16 \delta_y$ 区間の結果に影響している。

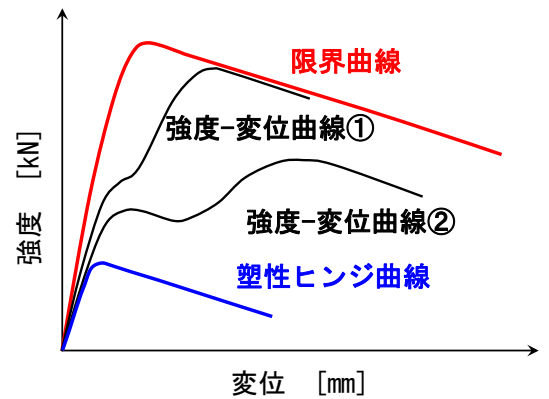


図-7 限界曲線とヒンジ曲線

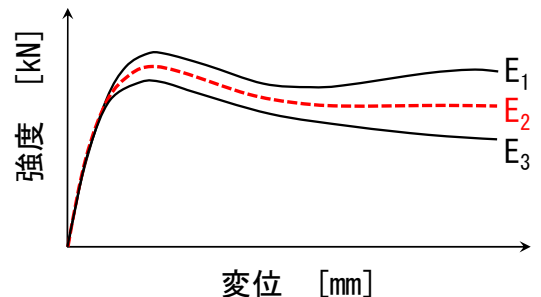


図-8 補間法のイメージ(破線)

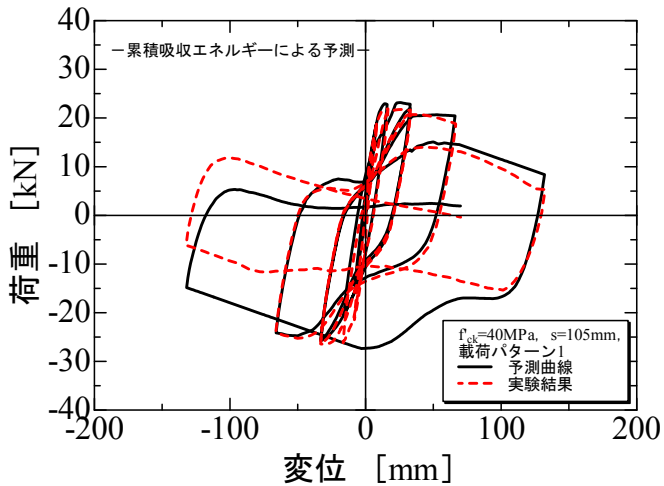


図-9 累積吸収エネルギーに基づく予測結果

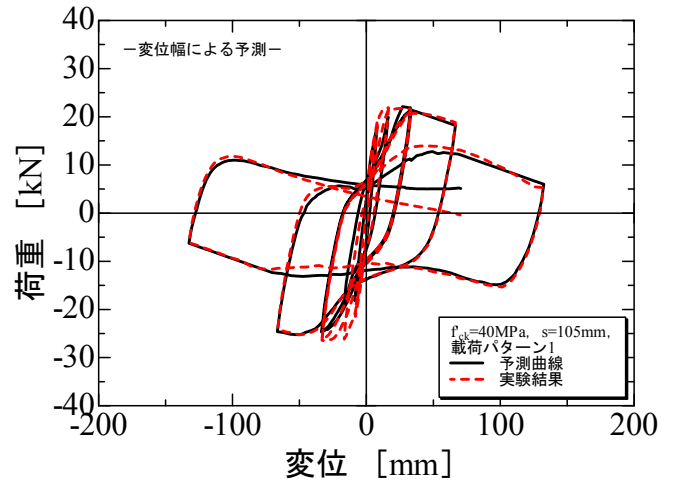


図-10 変位幅に基づく予測結果

4.4 モデルの検証

コンクリート強度および横拘束筋間隔が異なる場合の実験データに対して、変位幅量に基づくモデルの検証を行なった。図-11 および図-12 にその一例を示す。両ケースとも概ね精度の良い予測結果が得られた。

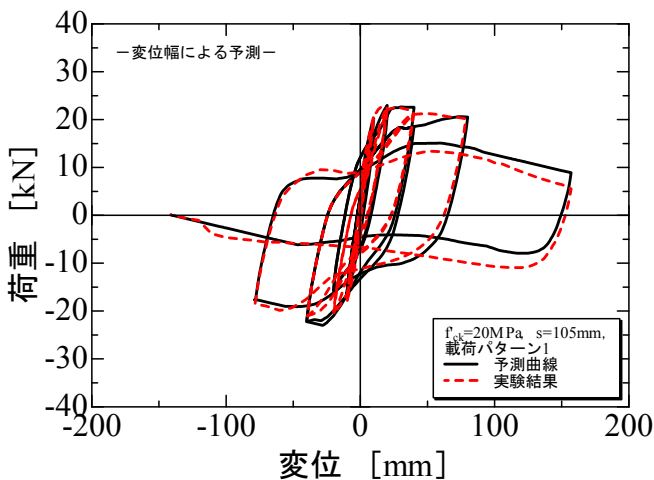


図-11 コンクリート強度を変化させた予測結果

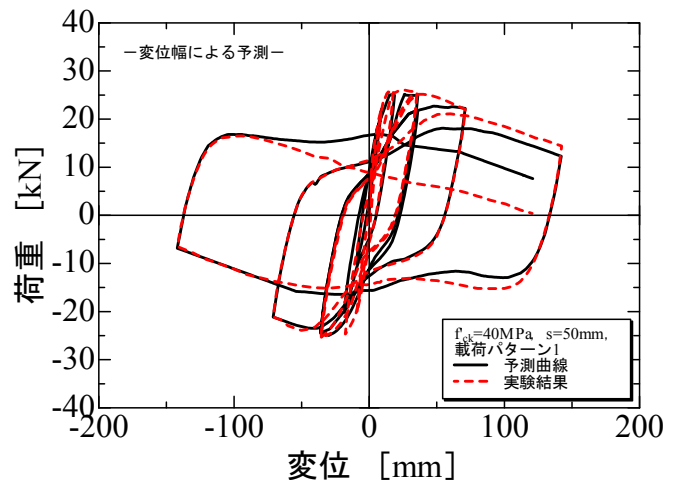


図-12 横拘束筋間隔を変化させた予測結果

5. 結論

- 1) 累積吸収エネルギーよりも、RC柱が過去に受けた最大の変位幅に基づいた予測の方が実験値に近い。
- 2) ポストピークまでの予測は精度が良いが、大変位レベルでの予測は実験値との差が大きくなった。
- 3) 復元力特性モデルを概ね策定することができたが、定量的な検討（ルール作り）が今後の課題となる。

謝辞

部門創成 B から卒業研究に至るまでご指導いただいた水野英二教授と、これまで私生活を支えていただいた家族に感謝します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用, 2013.
- 2) 木村秀樹・高津比呂人・石川裕次・武田浩：鋼繊維を混入した高強度コンクリート RC 柱に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.235-240, 2003.7.
- 3) 亀田好洋・鈴木森晶・水野英二：ポストピーク領域における鉄筋コンクリート柱の繰り返し耐荷特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol33, No.2, pp.199-204, 2011.