

論文 SRC 部材の安定限界変形量の評価に関する研究

土井 希祐^{*1}

要旨： SRC 部材の安定限界変形を、最大耐力の80%の耐力を保持する部材角 R_{80} で定義する。充腹形 SRC 部材の荷重-変位関係データベースによる検討結果から、 R_{80} は軸力比と強い負の相関があることが確認された。また、繰返し載荷の場合、 R_{80} は帯筋比と弱い正の相関があることが明らかになった。さらに、平面保持を仮定した材端コア断面における全塑性耐力時の曲率、および材軸方向の曲率分布を仮定した簡易な力学モデルに基づいた R_{80} の評価式を提案した。提案式は、帯筋比が0.2%を上回っていれば、概ね R_{80} を評価し得ると考えられる。

キーワード： SRC 部材, 曲げ破壊, 安定限界変形, 軸力比, 帯筋比

1. はじめに

充腹形鉄骨を内蔵する鉄骨鉄筋コンクリート（以後 SRC と記す）部材の内、曲げ破壊するものは、その変形性能が軸力の影響を強く受けることが報告されている。¹⁾ また、繰返し曲げを受ける SRC 柱部材は、曲げ耐力が低下しない安定した挙動を示す限界軸力が存在することが示され、その計算式も提案されている。²⁾

ところで、SRC 部材においても、帯筋によるコアコンクリートの拘束効果が変形性能に影響を及ぼすことが考えられる。しかし、帯筋による拘束効果の影響については十分検討されているとは言えない。本論文では、強軸方向の H 形鋼を内蔵する SRC 部材を対象とし、曲げ破壊する場合の安定限界変形について、軸力比および帯筋比の影響を中心に分析する。さらに、簡易な力学モデルによる評価法を示し、その妥当性を検討する。

2. 曲げ破壊する SRC 部材の安定限界変形

曲げ破壊する SRC 部材の変形性能は、RC 部材と同様軸力比の影響が大きく、高軸力下では最大耐力以降の耐力低下がかなり大きいこと、および RC 部材との比較を行う際の利便性を考

え、本論文では、安定限界変形を最大耐力の80%の耐力を保持する部材角 R_{80} と定義する。実験終了まで最大耐力の80%を下回らない場合は、部材角 4%を越える変形まで加力が行われている供試体のみを対象とし、実験における最大変形を R_{80} とする。繰返し載荷の場合は、荷重-変位関係の包絡線を対象とする。なお、曲げ破壊の定義は、加藤・称原式³⁾により行った。

本論文において検討に用いた実験資料は、SRC 部材の荷重-変位関係に関する既往実験データベース⁴⁾ 中の供試体の内、上記の条件を満たすもので、データ数は、繰返し載荷32体、単調載荷16体である。⁴⁾⁻¹³⁾

図-1~2 に R_{80} と軸力比 n ($=N/N_0$, N_0 : 1 軸圧縮耐力) との関係を示す。繰返し載荷では単調載荷と比較して R_{80} が低い、何れの場合も軸力比と強い負の相関が認められる。なお、 R_{80} の下限値 R_{80}' は

$$R_{80}' = 6 - 24n \quad (1)$$

で概ね評価できる。

図-3~4 に R_{80} と帯筋比 p_w との関係を示す。繰返し載荷では R_{80} と p_w に弱い正の相関が認められる。一方、単調載荷では、 $p_w > 0.5\%$ のデータが無いこともあり、 R_{80} と p_w の間に明

*1 新潟大学講師 工学部建設学科 工博（正会員）

瞭な相関関係は見出せない。

現行の建築学会S R C構造計算規準では、開断面充腹形鉄骨を内蔵する部材のpwの下限値は0.1%と規定されている。ところで、図-3によれば、 $pw < 0.2\%$ では、 $R_{80} < 3\%$ となる供試体が相当数存在し、中には $R_{80} = 2\%$ 程度のももある。従って、最大耐力の面からは問題が無くとも、変形性能の面からは、 $pw=0.2\%$ を上回る帯筋を配置することが望ましいと思われる。

最後に、図-5~6に R_{80} と軸鉄骨断面積比psとの関係を示す。繰返し載荷では、 R_{80} とpsには、pwの場合と異なり明瞭な相関が認められない。単調載荷では、 $ps < 4\%$ の供試体が存在しないため、pwと同様に、 R_{80} とpsには明瞭な

相関は認められない。

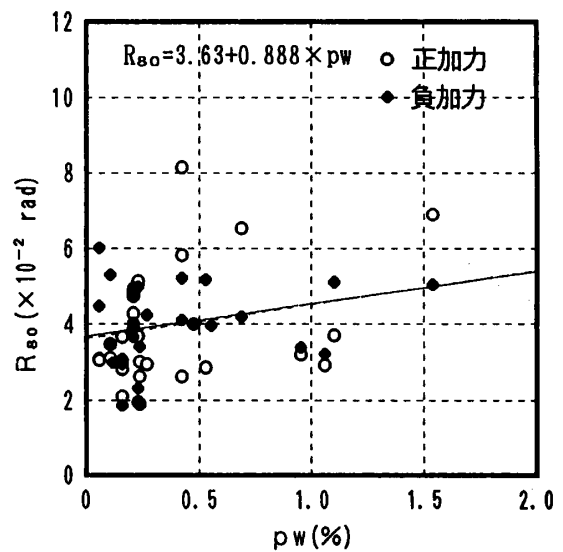


図-3 R_{80} と帯筋比(繰返し載荷)

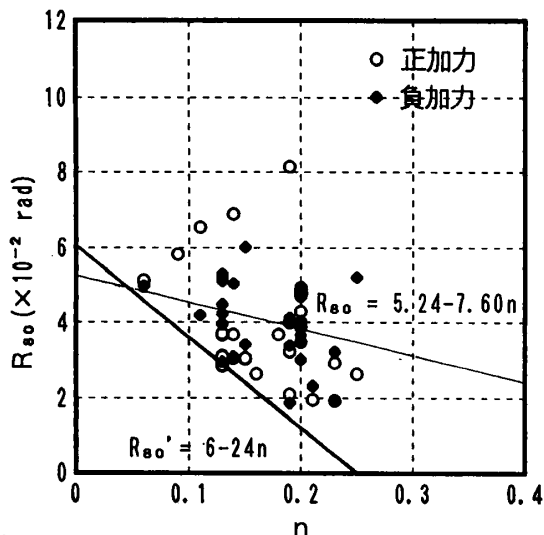


図-1 R_{80} と軸力比(繰返し載荷)

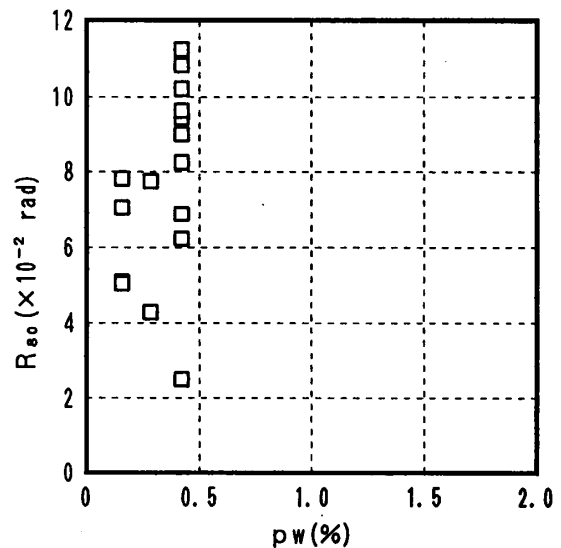


図-4 R_{80} と帯筋比(単調載荷)

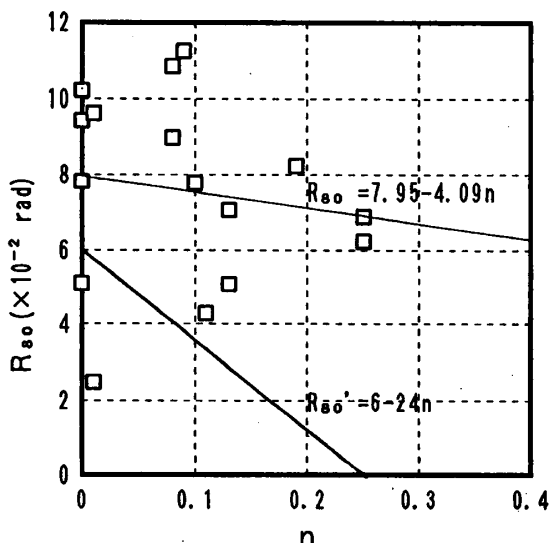


図-2 R_{80} と軸力比(単調載荷)

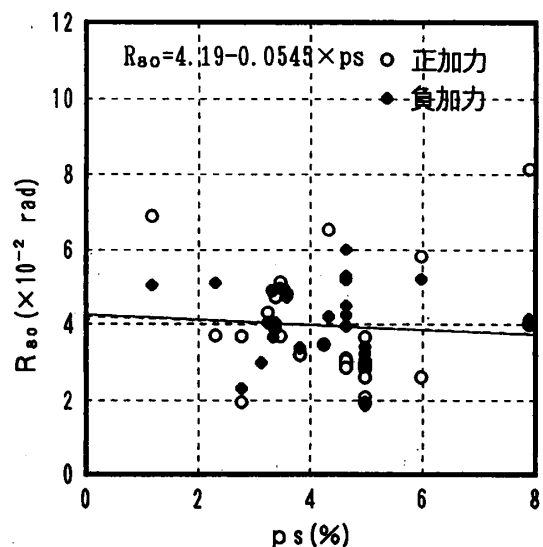


図-5 R_{80} と軸鉄骨比(繰返し載荷)

3. 安定限界変形の評価法

一般的に、曲げ破壊するSRC部材では、材

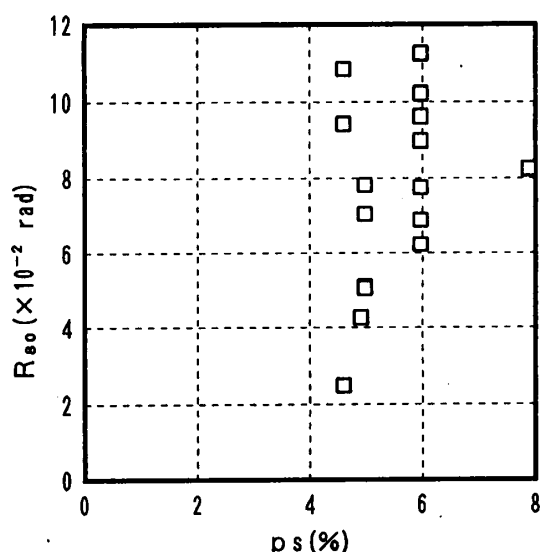


図-6 R_{80} と軸鉄骨比(単調載荷)

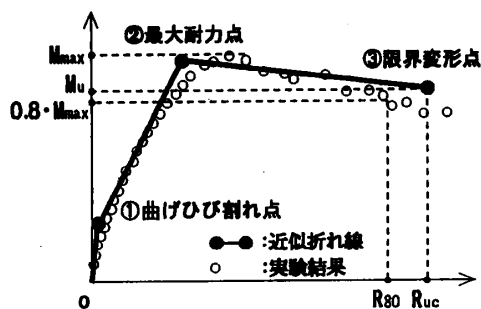


図-7 限界変形部材角 R_{uc}

端部における圧縮側コンクリートの圧壊の進行により、最大耐力時以降に耐力低下を生じ、特に、高軸力下での繰返し載荷において著しい。そこで、以下に示すように、安定限界変形 R_{80} の評価法として、文献14)で提案した限界変形部材角 R_{uc} の算定法を用いることとした。(図-7 参照)

すなわち、図-8に示す②の部分のコンクリートを無視したときの全塑性モーメント M_u に対応する断面の塑性中立軸位置 x_u と圧縮側主筋位置におけるコンクリートの限界歪 $c\epsilon_u$ から定まる限界変形曲率 ϕ_u を求める。(図-9 参照) 一般的に、コンクリートの圧壊ひずみは 0.003 程度とされているが、本論文では、帯筋および鉄骨フランジの拘束効果を考慮し、①部分のコンクリートの限界歪 $c\epsilon_u = 0.01$ とした。一方、

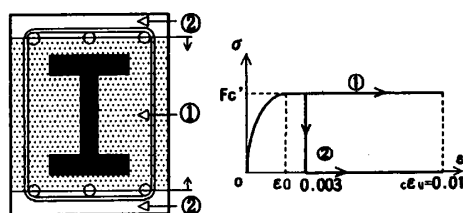


図-8 拘束コンクリート

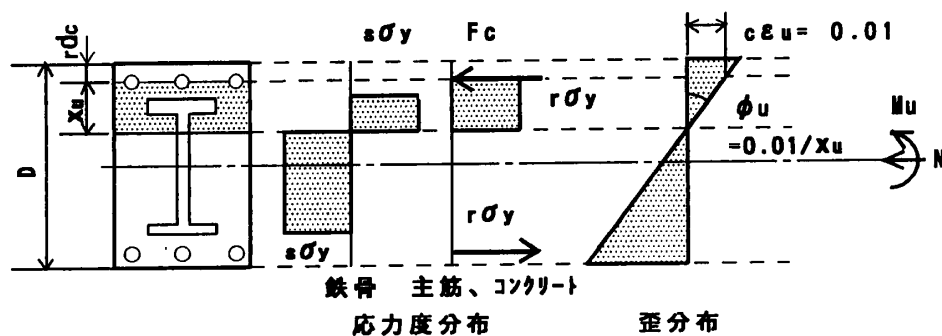
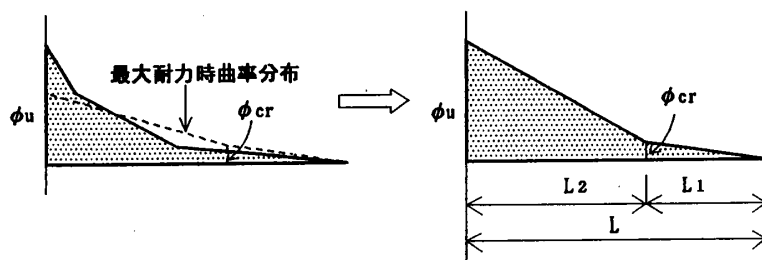


図-9 限界変形モーメント M_u 、および限界変形曲率 ϕ_u の算定方法



(a) 限界変形点曲率分布モデル. 1 (b) 限界変形点曲率分布モデル. 2

図-10 限界変形点における曲率分布

②部分のコンクリートは、 $\varepsilon = 0.003$ で圧縮強度を失うものと仮定した。(図-8参照) 従って、限界変形曲率 ϕ_u は次式で与えられる。

$$\phi_u = 0.01/x_u \quad (2)$$

図-10(a)に示すように部材を片持ち梁に置き換え、曲げ変形について考えると、限界変形点においては、材端近傍の曲率が増加し、自由端側では弾性除荷を生じる。しかし、限界変形点においては、コンクリートのひび割れ、圧壊、付着劣化等による変形がかなり大きいと考えられる。そこで、せん断変形成分を間接的に含む形で、変形限界点における曲率分布を図-10(b)に示すように仮定した。この時、部材の曲げ変形成分 $f\Delta u$ は以下の様に表される。

$$f\Delta u = \phi_{cr} \cdot \left(\frac{L_1^2}{3} + \frac{L_1 \cdot L_2}{2} + \frac{L_2^2}{6} \right) + \phi_u \cdot L_2 \cdot \left(\frac{L_1}{2} + \frac{L_2}{3} \right) \quad (3)$$

ここに、 ϕ_{cr} ： 曲げひび割れモーメントに対応する断面の曲率、 L ： 部材を片持ちばりに置き換えたときの材長、 L_1 ： 曲げひび割れを生じていない区間の長さ、 L_2 ： 曲げひび割れを生じている区間の長さ。(図-10(b)参照)

次に、引張主筋の定着部からの抜出し $r\delta B$ による付加変形 $B\Delta u$ は、文献14)、15)と同様に、定着部における主筋の歪分布を直線分布とし、次式で与えられるものとした。(図-11 参照)

$$r\delta B = r\epsilon t \cdot L_t / 2 \quad (4)$$

ここに、 $r\epsilon t$ ： 引張主筋の歪度、 L_t ： 主筋の定着長さ。

主筋の定着長さ L_t は、付着応力度を 30kg/cm^2 ($\approx 3\text{N/mm}^2$)として引張主筋の引抜き力に見合うよう算定した。材端部断面において中立軸位置まわりに回転変形 $B\theta_u$ が生じるものとすれば、

$$B\theta_u = r\delta B / d_{nu} \quad (5)$$

ここに、 d_{nu} ： 引張側主筋と中立軸の距離
よって、

$$B\Delta u = B\theta_u \cdot L \quad (6)$$

従って、変形限界点における変形 Δu および部材角 R_{uc} は以下のように表される。

$$\Delta u = f\Delta u + B\Delta u \quad (7)$$

$$R_{uc} = \Delta u / L \quad (8)$$

表-1および図-12に、(8)式による部材角 R_{uc} と R_{80} との対応を示す。単調載荷においては概ね実験結果の下限を、繰返し載荷においては概ね実験結果の中央値を抑えていると考えられる。繰返し載荷では、単調載荷の場合と比較してコ

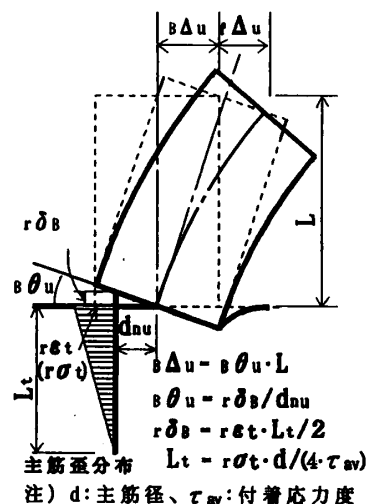


図-11 鋼材の抜出しによる付加変形

表-1 計算値と実験値の対応

	単調載荷	繰返し載荷
平均値	1.495	1.021
標準偏差	0.642	0.334
変動係数	0.429	0.327

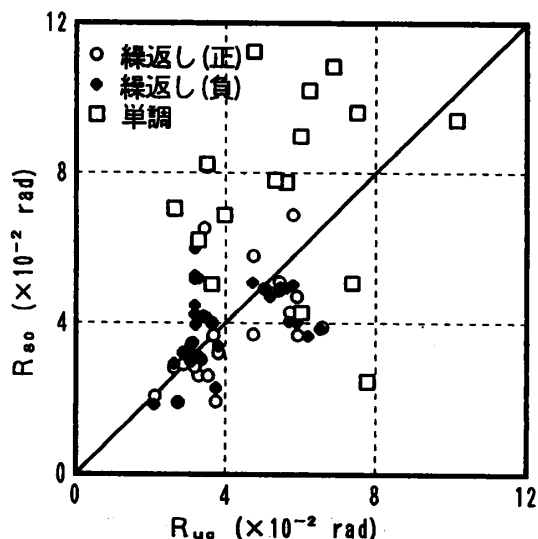


図-12 限界変形部材角計算値と実験値

ンクリートの損傷の影響が大きく出ていると考えられる。

図-13～14に R_{80}/R_{uc} と帯筋比 p_w との関係を示す。 $p_w > 0.8\%$ では、計算値と実験値の対応は良好である。しかし、 $p_w < 0.8\%$ において、計算値が実験結果をかなり上回るもの、あるいは下回るものが見られる。実験値が計算値を大幅に上回るものは、比較的小さい振幅での繰返し载荷の後、最終状態まで単調载荷的に加力を行っている⁹⁾、あるいは繰返しの回数が少ない¹³⁾ 等のためと考えられる。一方、実験値が計算値を大幅に下回るものは、鉄骨に高張力鋼を用いている¹¹⁾、あるいは主筋に高強度鉄筋を用いている¹³⁾ 等の影響と考えられる。

現行の建築学会SRC構造計算規準において、開断面充腹形鉄骨を内蔵する部材の p_w の下限値は0.1%と規定されている。ところで、図13～14によれば、 $R_{80}/R_{uc} < 0.8$ となる供試体は、 $p_w = 0.2\%$ の付近に集中している。従って、(8)式を安定限界変形の評価式として用いるためには、 $p_w = 0.2\%$ を上回ることが必要と考えられる。なお、単調载荷においても $R_{80}/R_{uc} < 0.8$ となる供試体が見られる。これは、作用軸力が低く、耐力低下が生じにくい供試体であることに加え、変形性能と比較して相対的に小さい変形レベルで実験終了となっている^{6), 7)}、あるいはせん断破壊と曲げ破壊の境界付近の供試体である⁶⁾ 等のためと考えられる。

図15～16に R_{80}/R_{uc} と軸鉄骨比 p_s の関係を示す。 R_{80}/R_{uc} と軸鉄骨比には明瞭な相関は見られず、実験結果と計算値の対応に大きな影響を及ぼす要因とはなっていない。

以上の検討から、曲げ破壊するSRC部材においても、帯筋によるコアコンクリートの拘束が適切に行われていれば、比較的簡易な力学モデルによっても、その安定限界変形量を概ね評価しうることが明らかとなった。しかし、帯筋拘束の効果を始めとする各種パラメータの変動に影響されない精度の高い安定限界変形量の評価を行うためには、コアコンクリートの強度に

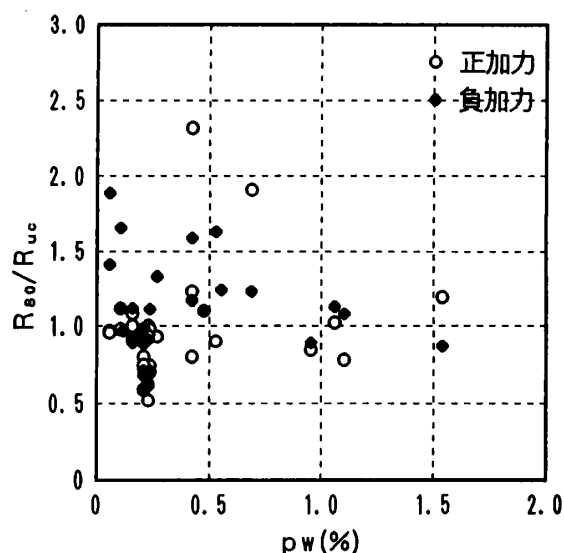


図-13 R_{80}/R_{uc} と帯筋比 (繰返し载荷)

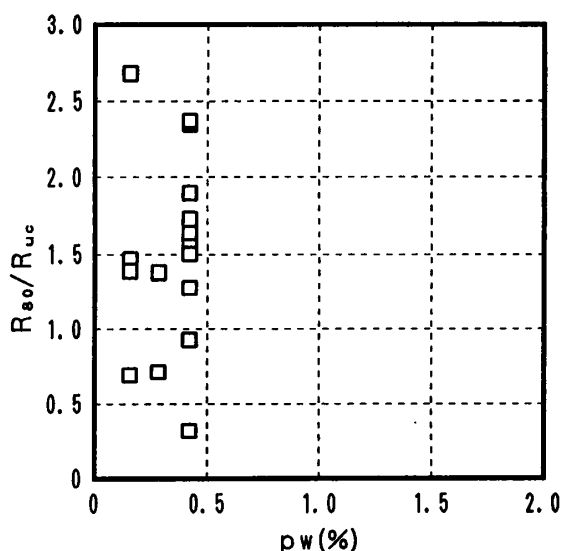


図-14 R_{80}/R_{uc} と帯筋比 (単調载荷)

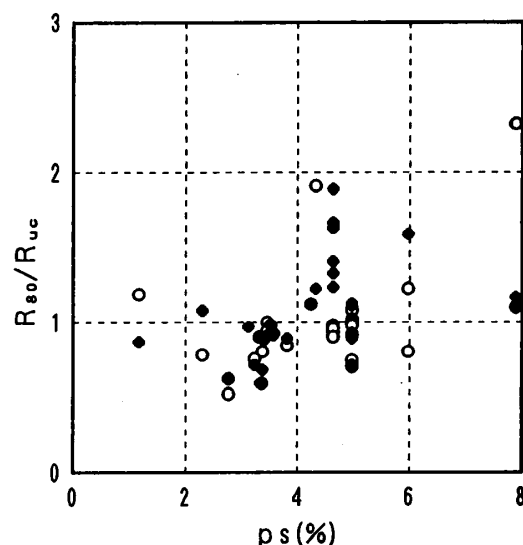


図-15 R_{80}/R_{uc} と軸鉄骨比 (繰返し载荷)

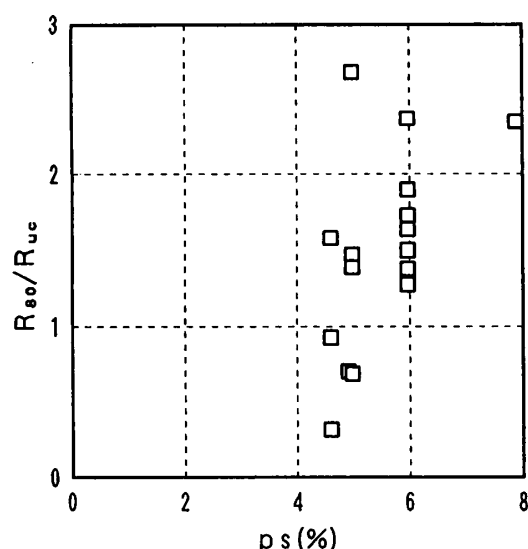


図-16 R_{uo}/R_{oe} と軸鉄骨比(単調載荷)

帯筋拘束の影響を取り入れる等の改善が必要であるとえられる。

4. まとめ

データベースによる検討の結果、曲げ破壊するSRC柱梁部材の安定限界変形は軸力比と強い負の相関があることが確認された。さらに、繰返し載荷の場合、帯筋比と弱い正の相関があることが明らかとなった。

簡易力学モデルにより、安定限界変形を推定する評価式を提案した。帯筋比が0.2%を上回っていれば、提案式により安定限界変形を概ね評価できる。今後の課題として、より適切な評価式とするためには、帯筋の拘束効果を取り入れることが必要である。

参考文献

- 1) 称原良一・松本良一郎：SRC柱梁部材の耐力と変形性能（その1），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅱ，1109-1110，1990.10
- 2) 江冠華・松井千秋・津田恵吾：SRC柱材の安定限界軸力の計算法，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅱ，1713-1714，1992.8
- 3) 加藤勉・称原良一：鉄骨鉄筋コンクリート部材の耐力，日本建築学会論文報告集，266号，pp. 19-29，1978.4

4) 土井希祐：鉄骨鉄筋コンクリート部材の荷重－変位履歴特性モデルに関する研究，東京大学博士論文，1993.6

5) 西田理：鉄骨鉄筋コンクリート部材の曲げせん断破壊に関する実験的研究，東京大学修士論文，1974.3

6) 称原良一：鉄骨鉄筋コンクリート柱の耐力に関する実験的研究，東京大学修士論文，1976.3

7) 仲威雄ほか：鉄骨鉄筋コンクリート柱の耐力と履歴特性に関する実験的研究，日本建築学会論文報告集，232号，pp. 89～99，1975.6

8) 仲威雄ほか：鉄骨鉄筋コンクリート柱の耐力と履歴特性に関する実験的研究（その2），日本建築学会論文報告集，260号，pp. 47～58，1977.10

9) 中野清ほか：高強度スパイラルせん断補強筋を用いた鉄骨鉄筋コンクリート部材に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 2495～2496，1983.9

10) 南宏一ほか：鉄骨鉄筋コンクリート柱のせん断破壊に関する実験的研究 その5，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1549～1550，1973.10

11) 小西昌治ほか：高張力鋼を用いたSRC構造の開発研究 No.13，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅱ，pp. 1339～1340

12) 木村衛ほか：曲げ降伏型鉄骨鉄筋コンクリート柱の弾塑性々状，日本建築学会論文報告集，306号，pp. 31-39，1981.8

13) 鈴谷二郎・川名秀人：高強度鉄筋を用いた鉄骨鉄筋コンクリート柱の力学的性状に関する実験的研究，東北工業大学紀要 I 理工学編，第4号，pp. 23-40，1984.3

14) 土井希祐：鉄骨鉄筋コンクリート部材の荷重－変位履歴特性モデルに関する研究 スケルトンカーブモデルについて，構造工学論文集，Vol. 41B，pp. 403-410，1995.3

15) 土井希祐：鋼材の抜出しを考慮したSRC部材の降伏変形の評価に関する研究，コンクリート年次論文報告集Vol. 18-2，pp. 1319-1324，1995.6