論文 組み合わせ応力を考慮した降伏線理論による RC 柱性能評価法に関す る研究

上原修一^{*1}·江崎文也^{*2}·久保田真次^{*3}

要旨:著者らが提案した,組み合わせ応力の相関を考慮した降伏線理論に基づくRC柱の解析法の妥 当性を,3体のRC柱の予備的な実験を通じて示している。水平強度および破壊断面の位置を比較す るほか,変形性能の評価法についても言及している。次に,破壊断面角度の評価法を簡略化し,主 筋量と帯筋量により予測できる推定式を示している。さらに,その簡略化した評価法によっても, RC柱の破壊性状を精度よく評価できることを示している。

キーワード: せん断, 降伏線理論, 極限解析, 上界定理, 変形性能

1. はじめに

著者らは,これまでに組み合わせ応力の相関を考 慮した降伏線理論に基づくRC柱や耐震壁の解析法 を提案した^{1),2)}。さらに,既往の実験結果を用いて その解析法を検証してきた^{3),4})。単に水平耐力の比 較だけであれば,それで十分であるが,破壊面の対 応や鉄筋の降伏状況の対応を確認するためには,い くらかの実験が必要である。さらに,変形能力の評 価法のモデル構築のためには,実験における破壊状 況を解析結果と比較しながら観察する必要がある。 したがって,本論文では,この目的のために行った RC柱3体の予備的な実験結果と降伏線理論による解 析結果について報告する。また,これまでに提案し た水平強度解析法では,破壊断面角度を変動させて 解析値を求めていた。これを簡単な式により求める 方法を提案し解析法の簡略化を試みる。

- 2. 実験概要
- 2.1 試験体

表 -1 に,本実験の試験体一覧,表 -2 に使用した 材料の力学的性質を示す。ここで,」は主筋に関



*1 有明工業高等専門学校教授 建築学科 博士(工学)(正会員)

*2 九州共立大学工学部教授 建築学科 工学博士 (正会員)

*3 有明工業高等専門学校専攻科 建築学専攻

する鉄筋係数(=pg y/ B, pg:主筋比, y:主筋 降伏点, B:コンクリート圧縮強度), Wは帯筋に 関する鉄筋係数(=pw yw/ B, pw:帯筋比, yw:帯 筋降伏点)である。試験体は,シアスパン比をM/QD = 1.5,引張鉄筋比を0.953%,軸力比nを0.185 (N=234 k N)と固定し,帯筋比のみを実験変数とした。これは,これまでの検討から,帯筋量の破壊断面角度におよぼす影響が最も大きいことがわかっている¹⁾ためである。試験体No.1は,主筋弾性破壊型(せん断破壊先行型),試験体No.2,No.3は主筋



図 -2 試験体 No.1 (C-1.5-0.953-0.263)の強度と破壊断面に関する実験結果と解析結果の比較



(a) 破壊状態 (b) 水平荷重と部材角 (c) 実験結果と解析結果の比較 図 -4 試験体 No.3 (C-1.5-0.953-0.1.600)の強度と破壊断面に関する実験結果と解析結果の比較

降伏破壊型(曲げ降伏先行型)となるよう配筋した。 また,各材料は基礎的な性状を確認する目的から, 一般的なものを用いた。

図 -1 に試験体の形状を示す。配筋は試験体 No.2 のものを示している。ひずみゲージはそれぞれ,中 央の主筋の柱頭部および柱脚部に貼付した。そのほ か,材端から2本目の帯筋にも貼付した。

2.2 加力方法と測定装置

加力装置は,建研式型であり文献5)に示すもの と同じである。一定軸力のもとで,交番載荷するこ となく単調に一方向に加力した。これは,本実験の 目的が降伏線理論による解析と実験の基礎的な対応 を確認するためであり,交番載荷によりいたずらに 破壊形を複雑にしないためである。

変形量の測定についても文献5)の測定装置と同 じである。つまり,上下スタブ間の相対水平変位と 鉛直変形量を,変位計により測定した。

3. 実験結果と降伏線理論による性能評価

3.1 実験結果

図 -2から図 -4に破壊性状および水平強度と破壊 断面に関する実験結果と解析結果の比較を示す。

試験体 No.1 は,帯筋量が最も少ない試験体であ る。80kNで材端部45度方向にせん断ひび割れが確 認された。その後,材端部の主筋はすべて降伏せず に,柱頭のせん断ひび割れが大きくなり終局に至っ た,図-2(a)に示すように,大きいひび割れは,柱 頭部の1本であり,水平に分離していることから も,主筋が弾性のまま破壊したと認められる。

試験体No。2は,90kN程度で曲げひび割れが視認 された。ほぼ同時にせん断ひび割れも認められた。 引張側主筋は降伏し,圧縮鉄筋もほぼ降伏応力状態 に近い。しかしながら,図-3(a),(b)からわかる ように,最大強度に達した後,ほぼ同時に主筋に そってひび割れが発生し,付着破壊した。

試験体No.3は、帯筋が最も多い試験体である。図-4(b)の荷重部材角関係では,90kN程度で曲げひび 割れの影響による剛性低下が認められる。このひび 割れは,その後の状況から部材端部の曲げひび割れ と考えられた。圧縮側引張側の主筋ともそれぞれ圧 縮降伏,引張降伏し,分離した柱の中央要素が回転 し,圧縮側のコンクリートが圧縮破壊することによ り終局に至った。図-4(a)に示すように,柱両端 部の曲げひび割れのほかはほとんどひび割れがな く,両端部の曲げひび割れが大きく開いて終局に 至ったことから,破壊断面は柱両端部と認められ た。

3.2 降伏線理論による水平強度,破壊断面角度と変形性能評価

これらの試験体3体について,これまで提案した 方法により,水平強度qと破壊断面勾配h_f/D(h_f:破 壊断面が引張側の外縁と交わる点の部材脚からの高 さ,D:柱せい)について検討した。図-2から図-4 の(c)にその解析結果を示す。それぞれ水平強度の 算定は,次の方法による。

主筋降伏解は,文献1)に示す方法による。なお, その際,コンクリート圧縮強度有効係数 = 1.0と している。これは,主筋降伏解におよぼす有効係数 の影響が小さい³⁾ことがわかっており, = 1.0と しても実験結果とよく適合する⁴⁾ためである。

また,主筋弾性解は,文献4)に示す方法による。 なお,主筋弾性解の算定にあたり,有効係数評価式 の適用範囲として wが0.1以上と規程しているが, これはひび割れ強度により水平強度が定まるものを 完全に排除するため⁴⁾であった。そのため,試験体 N0.1,No.2も適用範囲外であるが,いずれもせん断 ひび割れが発生したのち,終局強度に至った試験体 であることから,その評価式を用いて評価した。

図2-(c)に示す試験体No.1については,解析によ り,主筋弾性のまま破壊する(せん断破壊)ことが 予測された。試験体はせん断破壊しており,水平強 度,破壊断面の勾配も予測値とほぼ近い。したがっ て,この解析法により,よく予測できていることが わかる。

図3-(c)に示す試験体No.2については,付着破壊 をしたため,厳密には本解析法を適用できないが, 引張側主筋が降伏していることから,断面の強度に はほぼ達していると判断し適用してみた。破壊断面 についても,ひび割れから予測される断面を実験値 としている。強度はほぼ予測できているが,破壊断 面角度に少しずれがみられる。

図 4-(c) に示す試験体 No.3 については,解析に より,柱端部付近で主筋が降伏して破壊する(曲げ 破壊)ことが予測された。実験においては柱とスタ ブの境界断面で曲げ破壊している。水平強度も含め て,本解析により,よく予測できていることがわか る。

変形性能評価の一手法として, 靭性保証型指針⁶⁾ に示すせん断余裕度を用いた評価法と同様に,ここ で示す主筋降伏解と主筋弾性解を使った方法が考え られる。ここでは,試験体No.1はせん断破壊,試験 体No.2は付着破壊しているため適用できない。そこ で,試験体No.3のみに適用してみると,塑性ヒンジ 回転角は部材角で5%以上(7.5%)となった。実験



図 -5 逆対称加力を受ける RC 柱部材の降伏線¹⁾



図-6 破壊断面角度 ,の評価の推定式曲面

では,そこまで確認できていないが,同様な手法が 提案できる見込みがある。

- 4. 破壊断面角度の推定式
- 4.1 推定式の提案

これまでに提案した RC 部材の降伏線理論に基づ く解析法の中で,主筋弾性解の場合については,図-5に示す破壊断面角度 _f(=tan⁻(h_f/D))およびその ときの水平耐力Qは解析的に簡単に求められる。し かし,主筋降伏解の場合については,破壊断面角度 を変動させて,水平耐力が最小となる断面を探さな くてはならなかった。解析法を簡略化するために は, _fを求める推定式を定める必要がある。

これまでの研究で, 「に影響する主なパラメー タは主筋の鉄筋係数」と帯筋の鉄筋係数 である



図 -7 推定式破壊面角度 _{faply}と変動解析破 壊面角度 _{fally}との関係



図 -8 推定式破壊面角度による水平耐力 q_{aply}と変 動解析による水平耐力 q_{cally}との関係

ことがわかっている¹⁾。そこで,次の破壊断面角度 の推定値 _{faply}の算定式を提案する。

$$\theta_{faply} = 0.8860 \psi_l^{\frac{1}{4}} + 0.1395 \psi_w^{-\frac{2}{3}} - 0.7798 \qquad (1)$$

$$0 \le \theta_{faply} \le \tan^{-1}(\frac{2h}{D}) \tag{2}$$

ここで,h:反曲点高さ,D:柱せいである。なお, この式はRC規準書の柱せん断設計の例題に示す典 型的な柱を使って,,と、で変動させ,解析によっ て求められた破壊断面角度、を最もよく近似する 曲面として回帰的に求めたものである。

図-6はこの推定式のグラフを示す。

図 -7は,文献4)で解析した試験体について,変 動解析により得た破壊面角度 feally この推定式によ り得た角度 faply との関係を示す。ほぼよく近似で きていることがわかる。同様に,図-8は,同じ試験 体について,推定式による破壊断面角度による水平 耐力qaply と変動解析による水平耐力qcally との関係を 示す。水平耐力はほとんど差がないことがわかる。 つまり,水平耐力は破壊面角度には敏感ではないこ とがわかる。 図 -9 は _{feally} と _{faply}の差と各パラメータの関 係を示す。すべてのパラメータについて相関は見 られない。また,ほほ0.1ラジアン(5.7度)程度 の誤差で推定できることがわかる。

図 -10 は推定式破壊面角度による解析結果等と 各変数の関係を示す。ここで,q_{calle}は主筋弾性解 であり,q_{calle}が主筋降伏解より小さい場合は,水 平耐力はq_{calle}で定まることになる。破壊面角度お よび水平強度について, wが小さい場合および が大きい場合に誤差が大きい。しかし,誤差が大 きいところでは,破壊は主筋弾性解により支配さ れることから,実用的にはそれほど問題ないと考 えられる。

5. 結論

これまでに提案した降伏線理論に基づくRC柱の 解析法の検証のために行ったRC柱3体の水平加力 実験および破壊断面角度推定式による解析により, 以下のことがわかった,

(1)提案する解析法により,水平強度,破壊断面角 度,破壊種別(主筋降伏型もしくは主筋弾性型)の 予測がほぼ可能である。

(2) 変形能力評価法については、既往のせん断余裕





図 -10 推定式よる破壊面角度 _{faolv}および水平強度解析結果 q_{aolv}と各変数の関係

度に基づく方法と同様の手法が提案できる可能性が ある。

(3)破壊面角度推定式により,変動解析により求め られる破壊面角度をほぼ推定できる。

(4)破壊面角度推定式により解析しても,水平耐力 は変動解析から得られる解とほとんど変わらない。

謝辞

実験にあたっては,九州共立大学工学部技師高田一俊 氏,米原義則氏,青木治氏のほか,平成14年度九州共立 大学江崎研究室の大学院生および卒論生にお世話になり ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

上原修一,崎野健治,江崎文也:組み合わせ応力の相関を考慮した降伏線理論によるRC柱部材の極限解析,コンクリート工学論文集,Vol.10 No.3,pp17-31,1999.9

2)上原修一,崎野健治,江崎文也:組み合わせ応力の相関 を考慮した降伏線理論によるRC耐震壁の極限解析,コン クリート工学論文集,Vol.10 No.3,pp33-46,1999.9
3)上原修一,崎野健治,江崎文也:組み合わせ応力の相関 を考慮した降伏線理論による142体の1型耐震壁の極限解 析,構造工学論文集,Vol.46B,pp547-560,2000.3
4)久保田真次,上原修一:組み合わせ応力の相関を考慮し た降伏線理論によるRC柱既往試験体の水平耐力の解析, コンクリート工学年次大会論文集,Vol.20,No.3,1998,pp655-660

6)日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靭性保証型 耐震設計指針・同解説,第6章,pp142-159,1999,8月30 日第2版