

論文 繰返し荷重を受ける RC 柱の損傷評価に関する研究

安富 陽子^{*1}・河野 進^{*2}・渡邊 史夫^{*3}

要旨：曲げ降伏後の破壊性状が曲げ卓越型からせん断卓越型と異なるように設計した片持ち柱試験体 4 体を用いて繰返し静的水平載荷実験を行い，残留曲げひび割れ幅の推定方法を検討した。この結果，部材回転角曲げ成分の関数として曲げひび割れ幅合計値を求める日本建築学会の方法は，ピーク時及び荷重除荷時の両方において安定して精度の高い予想結果を示した。しかし，残留率を用いた残留曲げひび割れ幅の算定方法や，曲げひび割れ合計値から最大曲げひび割れ幅を求める算定方法には，未だに問題が残されていることが分かった。

キーワード：損傷評価，塑性ヒンジ領域，残留曲げひび割れ幅，高軸力，残留率，残留変形

1. はじめに

2004 年に日本建築学会から刊行された鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）・同解説¹⁾（以後，性能評価指針）において，性能評価項目の一つに残留ひび割れ幅が採用されている。しかし，柱の残留ひび割れ幅を算出する過程では，曲げひび割れ幅合計値から最大曲げひび割れ幅を求めるための係数 n_s や，ピーク時の曲げひび割れ幅から除荷時の残留曲げひび割れ幅を求める際に用いる残留率は，それらの値を求めるために用いた検証用試験体が少なく今後の検討を要すると記されている。そこで，横補強筋量と軸力を実験変数として終局時の破壊形式を曲げ卓越型からせん断卓越型まで変化させた 4 体の片持ち RC 柱繰返し載荷実験結果²⁾を用いて，残留曲げひび割れ幅算出手法の改良を目的とした検討を行った。

2. 実験概要

試験体を図 - 1 (a) に，実験変数を表 - 1 に示す。試験体は，横補強筋量と軸力比を実験変数とした 4 体である。この結果，文献 3) で計算される塑性ヒンジ領域における終局限界回転角が表中に示す通り異なっている。静的正負交番繰返し載荷を行なった結果，曲げ降伏後の終局時

破壊性状が表の上部から下部へ行くに従い，計画通り曲げ卓越型からせん断卓越型へ変化した。実験終了後に得られたひび割れ状況を図 - 2 に示す。実験の詳細は，文献 2) に示す通りである。

2.1 ひび割れ幅の測定方法

ひび割れ幅は，図 - 2 に示されるように試験体引張縁で観察された曲げひび割れに全て番号をつけ，2 回目の載荷繰返しにおいて，ピーク時および除荷時にクラックスケールを用いて測定した。ただし，最小目盛りである 0.05mm に未たないひび割れ幅は測定できないため，0mm と記録した。

また，クラックスケールで得ることが出来ない連続的なデータを得るため，変位計を用いたひび割れ幅計測も並行して行なった。試験体柱部分を図 - 1 (b) に示すように鉛直方向に 7 領域に分け，領域境界にインサートを埋め込んだ。このインサート間の相対変位を測るため，引張

表 - 1 試験体の配筋と実験変数

試験体名	実験変数		終局限界回転角 (%)
	横補強筋 (鉄筋比)	軸力比	
S6N2	D6@50 (0.533%)	0.20	1.67
S4N2	4@50 (0.229%)		1.23
S6N5	D6@50 (0.533%)	0.48	0.22
S4N5	4@50 (0.229%)		0.16

*1 関西電力 (正会員)

*2 京都大学 工学研究科建築学専攻 助教授 Ph. D. (正会員)

*3 京都大学 工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

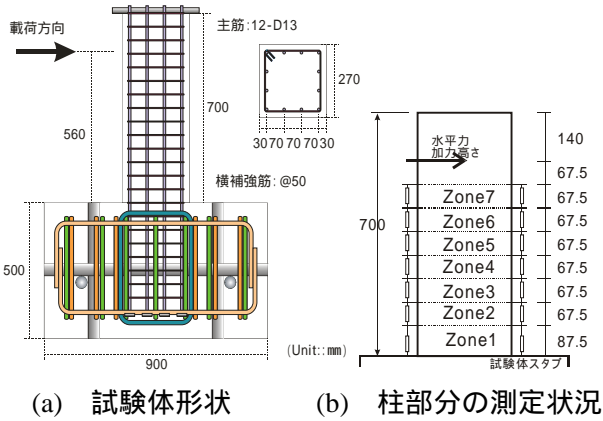


図 - 1 柱の変位測定ブロック (単位: mm)

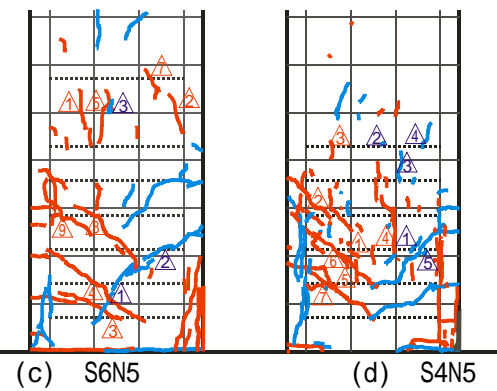
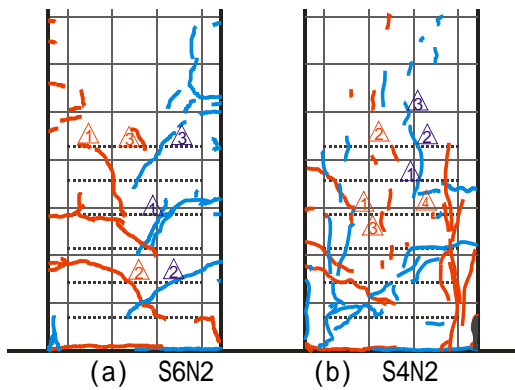


図 - 2 残留時ひび割れ幅合計値の推移

縁および圧縮縁となる面 (紙面の左側と右側) に検長 25mm の変位計を計 14 個設置した。

3. ひび割れ幅に関する実験結果

ひび割れ幅をクラックスケールで測定し, 全てのひび割れに関して合算したひび割れ幅合計値を W_c とする (c は, crack gage を示す)。また, 図 - 1 (b) に示す 7 領域の引張側と圧縮側における変位計から得られた伸び量から軸変形の線形分布を仮定して柱引張縁位置での伸び量を

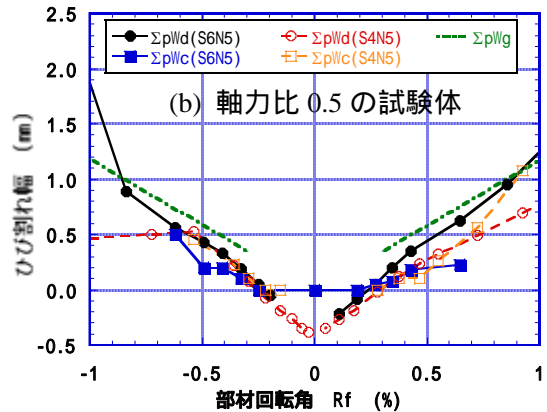
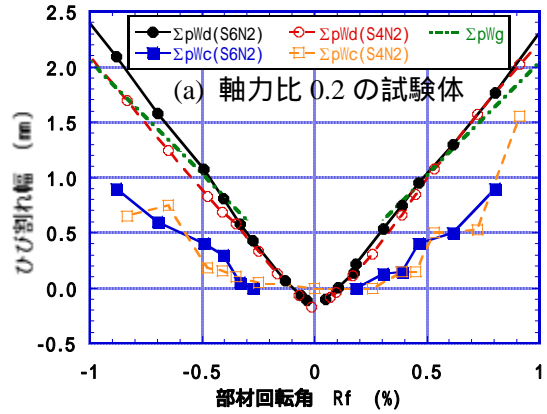


図 - 3 ピーク時ひび割れ幅合計値の推移

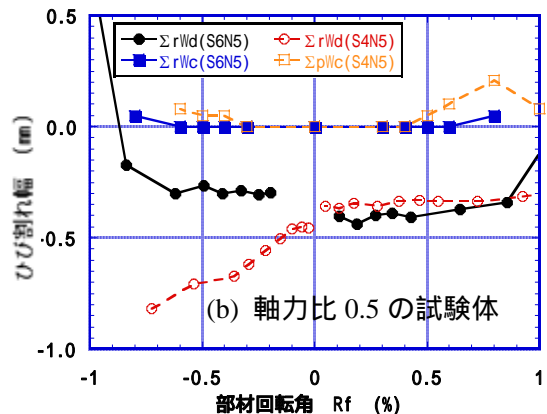
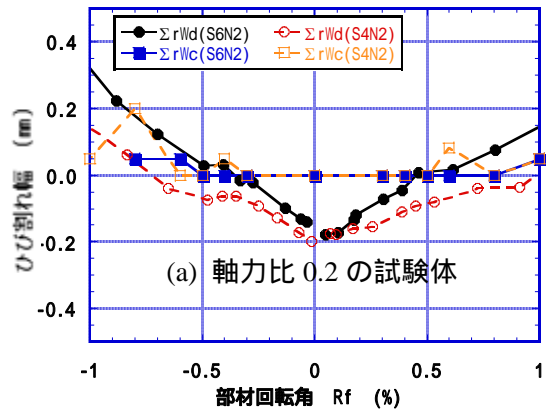


図 - 4 残留時ひび割れ幅合計値の推移

求め、全ての領域で合計した値を W_d とする (d は、displacement gage を示す)。

3.1 ピーク時ひび割れ幅

ピーク時における W_c および W_d を、それぞれ ${}_pW_c$ および ${}_pW_d$ とし (p は、peak 時を示す)、これらの推移を図 - 3 に示す。横軸は曲げ変形のみによる部材角 R_f である。軸力比 0.2 の 2 体では、 R_f の増加に伴い ${}_pW_c$ よりも ${}_pW_d$ が最大で 1mm 程度大きいものの、曲線の傾き具合は似ている。これに対して、軸力比 0.5 の 2 体では、 ${}_pW_c$ および ${}_pW_d$ の値がほぼ一致していた。また、2 つの軸力比で、横補強筋量の違いによる影響は、ほとんど見られなかった。

また、同図に性能評価指針のモデルに従い式 (1) で求めたピーク時ひび割れ幅合計値 ${}_pW_g$ を示す (g は、guideline を示す)。

$$\sum_p W_g = (D - x) \cdot R_f \quad (1)$$

ここで、 D は柱せい、 x は中立軸深さ $= N / (0.85 b_c)$ 、 b_c は柱幅、 b_c はコンクリート強度を示す (R_f は前出)。式 (1) では、軸力比が同じであれば、 ${}_pW_g$ は同じとなるため、各図には 1 セットのみの計算値 ${}_pW_g$ が描かれている。軸力比 0.2 の 2 体では、 ${}_pW_g$ と ${}_pW_d$ は非常によく一致している。軸力比 0.5 の 2 体では、S4N5 の正方向載荷時で ${}_pW_g$ が ${}_pW_d$ より 0.5mm ほど大きいものの、全体的には両者はよく一致している。

3.2 残留ひび割れ幅

除荷時における W_c および W_d を、それぞれ ${}_rW_c$ および ${}_rW_d$ とし、これらの推移を図 - 4 に示す (r は、residual を示す)。図 - 4 (a) の 2 体では R_f 0.3% の範囲で、 ${}_rW_c$ と ${}_rW_d$ はほぼ一致するが、 R_f 0.3% の範囲や図 - 4 (b) の 2 体では、目視で残留ひび割れが観測され、クラックスケールで幅を測定しているにも関わらず、変位計の値は 0 や負 (縮み) となっていたりと ${}_rW_c$ と ${}_rW_d$ に違いが見られる。これは、塑性ヒンジ部分である Zone1 や Zone2 などの領域における圧壊による軸縮みを変位計が算入しているためと考えられる。

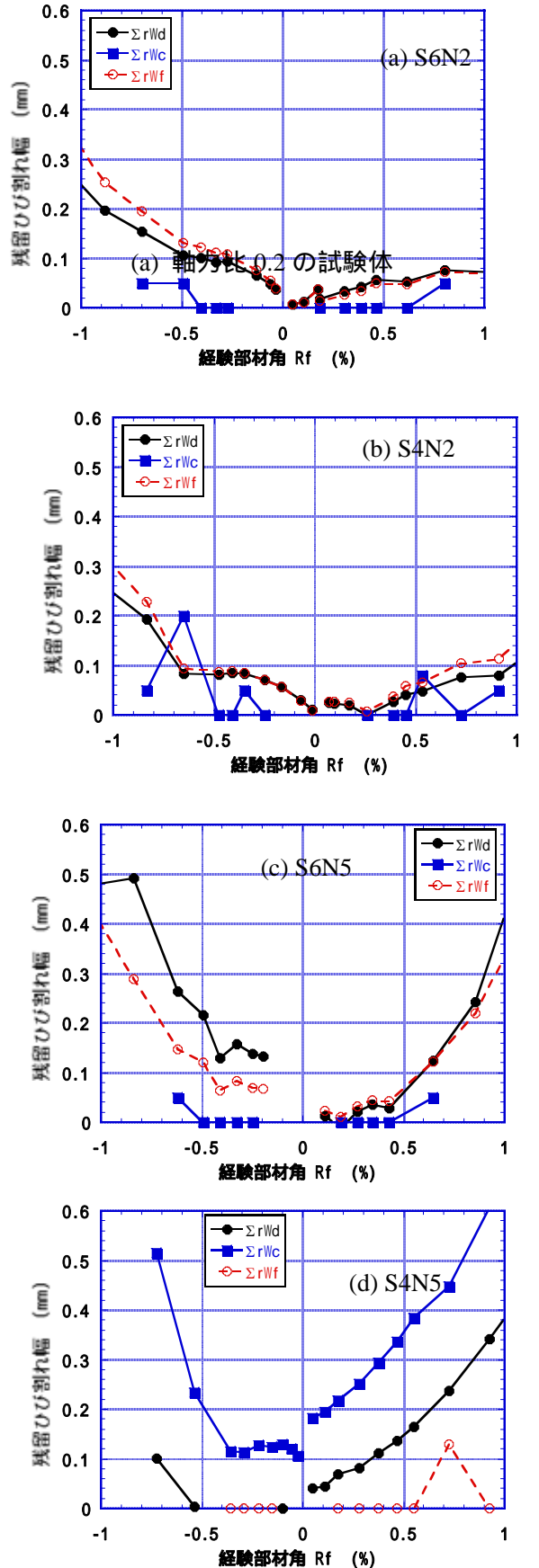


図 - 5 ${}_rW_c$ と軸縮みを考慮した ${}_rW_d$ の推移

そこで、図 - 1 (b)に示す圧縮側および引張側の変位計から断面中心の軸縮み量平均値を全ての領域で合算し、圧壊による軸縮みとみなした。この断面中心位置における軸縮み量を、それぞれの試験体で各サイクル毎に計算し、図 - 4 に示す rW_d から差し引いた値を図 - 5 に示す。軸力比 0.2 の 2 体では、 rW_c および rW_d が同じような傾向を示した。しかし、軸力比 0.5 の 2 体を見ると、 rW_c および rW_d の値には依然としてかなり差があり、傾向も異なる。これは、断面内において、断面中心における軸縮みと引張縁の軸縮みが必ずしも一致せず、軸力の高い試験体ではこの偏りが顕著になったためと考えられる。

4. 性能評価指針を用いた残留曲げひび割れ幅の算出手法

4.1 残留率

性能評価指針ではピーク時のひび割れ幅をまず求め、この値に残留率を乗じて残留ひび割れ幅を求めている。ピーク時のひび割れ幅算出方法は、PRC 指針式や性能評価指針などいくつかの信頼性の高い手法がある。しかし、残留率に関する研究は少なく、性能評価指針では柱・梁・耐震壁の各部材において、曲げひび割れであるかせん断ひび割れであるかに関らず、一律に残留率を 0.5 としている。しかし、残留率は、軸力・ひび割れ種類（曲げひび割れかせん断ひび割れか等）・損傷の進展状況で変化すると考えられ、検討の必要がある。

そこで、 rW_c を pW_c で除した値を残留率 RR_c 、 rW_d を pW_d で除した値を残留率 RR_d とし、図 - 6 に残留率の推移を示した。 RR_c の推移はどの試験体でもばらつきが大きく、その傾向をつかみきれないため、 RR_d を用いて検討する。まず、ひび割れ発生時に、残留率 RR_d が 1 を超える部分がある。これは、変形角が小さく損傷が小さいと、 rW_d と pW_d の値がいずれも測定可能長さに近くなり測定誤差が大きくなる。こうした場合に、たまたま分子 rW_d に比較して分

母 pW_d が大きくなったときに生じるエラーであると考えられる。そこで、図 - 6 においても R_f が 0.2% 以下の領域では、こうしたエラーが特に顕著となっているように見受けられる。

軸力比 0.5 の 2 体についてみると、正負方向で対称性が見られず、一部負の値もある。一般に軸力の大きな試験体のほうが曲げひび割れは閉じ易く、残留率が低いと考えられるが、今回の実験では確認することが出来なかった。そこで、軸力比 0.5 の 2 体に関してはばらつきがかなり大きく、残留率を一様に決めることが妥当でないと考えられる。軸力比 0.2 の 2 体では、ひび割れ発生直後の大きな残留率を除き、部材角 R_f が 0.2% 以上で 2.0% 以下の範囲では、 RR_d が 0.2 以下のほぼ一定値となった。いづれにしても、残留率を一律に 0.5 と仮定する性能評価指針の方法は、今回の 4 試験体に対しては適切でないと感じられる。

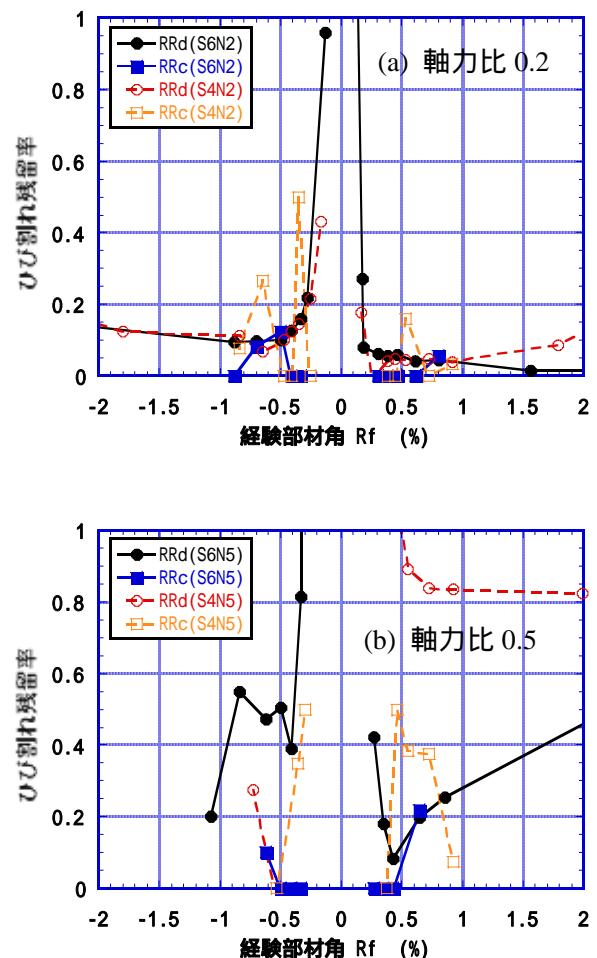


図 - 6 ひび割れ幅残留率の推移

4.2 最大残留ひび割れ幅の検討

性能評価指針の柱の項では、残留ひび割れ幅の最大値 rW_{max} を求める際に以下の3段階の手順をとる。式(1)を用いて R_f から pW_d を求める。式(2)を用いて pW_d から pW_{max} を求める。ここで、ピーク時の最大ひび割れ幅 pW_{max} とひび割れ幅合計値 pW_d は、係数 n_s を介して式(2)のような線形関係にあると仮定する。

$$pW_d = n_s \cdot pW_{max} \quad (2)$$

pW_{max} に一定の残留率0.5を乗じて rW_{max} を求める。ここで、 n_s については式(3)を用いて求めることとしている。

$$n_s = \frac{D}{2s} \quad (3)$$

ここで、 D は柱せい、 s は補強筋間隔である。性能評価指針では、試験体数の少なさから、 n_s に関しては今後の検討を要するとの記述がある。そこで、本実験における各試験体におけるひび割れ幅合計値 pW_d と、最大ひび割れ幅 W_{max} の関係を図-7に示す。正側を実線、負側を点線とし、凡例の横には原点を通過する直線近似をした場合の近似式と相関係数を示す。図-7(a)から(d)にいくに従い、に相当する係数が7.52から1.56まで低減していることが分かる。一方、性能評価指針が示す式(3)を用いて n_s を求めると柱せい D 、補強筋間隔 s が4試験体で共通であるので、 n_s は一律に2.70となる。つまり、それぞれの試験体で図に示すように大きく変化する n_s の値を、性能評価指針は一律2.70として取り扱おうとしていることが分かる。少なくとも、今回の試験体全てに式(3)を一律に適用することはできないと考えられる。

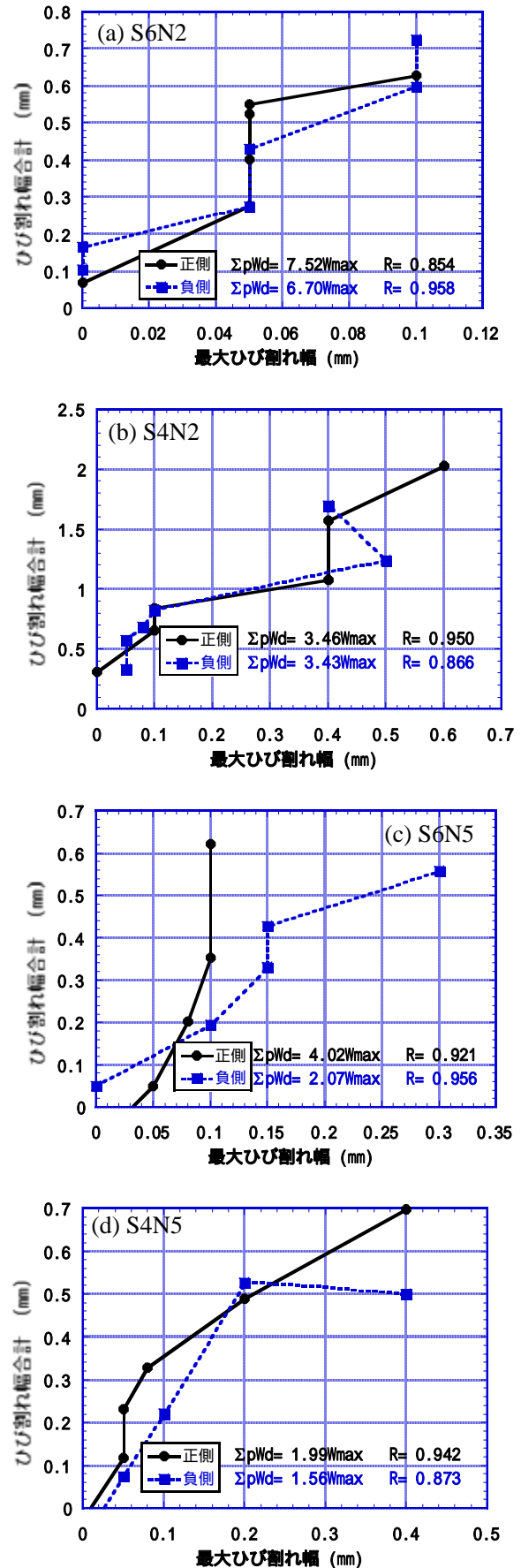


図-7 ひび割れ幅合計値-最大ひび割れ幅関係

5. 残留変形角曲げ成分から残留まげひび割れ幅を算出する方法

4章で性能評価指針による残留ひび割れ幅算出方法を示したが、ひび割れ幅の残留率には、材料の偏りなど不確定要素が多く、残留率を用いる手法では、精度の向上は限界がある。そこで、文献4)に示されるように残留部材角を予測し、残留部材角から残留ひび割れ幅を算出する手法に注目した。ここでは、残留部材角の曲げ成分 R_f と残留ひび割れ幅合計値の関係について、議論を行う。

そこで、式(1)を除荷時に適用し、実験で得られた残留部材角の曲げ成分を用いて残留ひび割れ幅の合計値 rW_f を算出した。図-5に計算結果を示す。図-5(d)を除いて、 rW_f と rW_d は良く一致している。また、 rW_f と rW_c は精度は落ちるものの、傾向は一致している。そこで、残留部材角曲げ成分を例えば文献4)に示されるような方法で得ることができれば、残留部材角曲げ成分から式(1)を用いて残留曲げひび割れ幅を精度良く予測できることになる。

4章に示すピーク時曲げひび割れに残留率を乗じて残留曲げひび割れ幅を求める方法では残留率の推定方法に、また5章に示す残留部材角曲げ成分から残留曲げひび割れ幅を求める方法では残留部材角曲げ成分の推定方法にまだ議論の余地があり、いずれにしても正確な残留曲げひび割れ幅を得るには、解決せねばならない問題が残されていると考えられる。

6. 結論

1. 曲げ変形による部材回転角から曲げひび割れ幅を求める性能評価指針の方法は、ピーク時においても残留時においても、高い精度を示した。ただし、軸力比が高いと精度が下がり、軸力比が低いと精度が上がる傾向があった。また、せん断補強筋量は、今回の実験結果に影響を与えなかった。
2. 残留率は、クラックスケールを用いた場合と変位計を用いた場合でかなりの差異を生

じ、ばらつきが大きな指標であると考えられる。軸力が0.2であれば、残留率を一定値0.2程度と考えることも可能な領域もあるが、軸力が0.5では、こうした値を決めることは妥当ではない。

3. 性能評価指針が示すピーク時の最大ひび割れ幅と、ひび割れ幅の合計値の比 n_s を柱せいとせん断補強筋の関数とする算出方法は、本実験結果への適用性が良くなかった。さらに実験データを積み重ね、適切な算定式を提案する必要があると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、国土交通省建設技術補助金を用いて行なわれました。実験に際しては、高周波熱錬および電気化学工業から資材提供、計測検査(株)にはデータ処理に関して多大なる協力を頂きました。また、実験およびデータ整理に関しては、当時4回生の帖佐和人君の協力を得ました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説，pp.169-173，2004
- 2) 安富陽子・河野進・下澤正道・渡邊史夫：一定軸力を受けるRC柱の残留ひび割れと残存性能の定量化，JCI年次論文報告集，Vol.27，No.2，pp.259-264，2005
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，pp.140-141，1999
- 4) 文野正裕・永山憲二・前田匡樹・田才晃：RC柱の損傷状態に基づく残余耐震性能の評価，JCI年次論文報告集，Vol.23，No.3，pp.1447-1452，2001
- 5) 佐々木潤一郎・加藤大介：RC柱のひび割れ幅、圧縮領域長さおよび軸負担性能の評価法，JCI年次論文報告集24-2，pp.253-258，2003