

論文 一定軸力を受ける RC 柱の残留ひび割れの定量化

安富 陽子^{*1}・河野 進^{*2}・下澤 正道^{*3}・渡邊 史夫^{*4}

要旨：横補強筋量と軸力を実験変数とした4体のキャンチレバー型 RC 柱を用いて正負交番繰返し載荷実験を行い，曲げ卓越型からせん断卓越型までの破壊形式を実現した。それぞれの試験体について，終局状態に至るまで，変形と共に進行するひび割れの状況を観測した。また，各載荷ステップ終了後のスキャン画像により得られたひび割れ幅・長さを用いて，残留ひび割れとピーク時ひび割れ幅を定量化し，柱部材のひび割れ幅の残留率として0.2 という値を提案した。

キーワード：損傷評価，塑性ヒンジ，残留ひび割れ幅，高軸力，デジタル画像

1. はじめに

現在，建物を設計する際には，地震時に倒壊を防ぎ人命を保護するだけでなく，地震後の建物の損傷による経済的損失まで考慮することが求められている。最終的には，設計時に，建物の使用期間中に受ける地震被害の修復費用まで含めた，ライフサイクルコストの提示することが目的である。このため，耐震性能を指標とする設計方法が必要とされており，2004 年には日本建築学会から耐震性能評価型設計指針¹⁾(以後，性能評価指針)が発行された。しかし，これには未だ不明確な領域が残っており，今回はこのうち柱の性能評価について，次の二つの目的で，横補強筋量と軸力を実験変数とした4体のキャンチレバー型 RC 柱試験体を製作し，地震時繰返し載荷実験を行った。

一つ目は，ひび割れ幅の残留率の定量化である。性能評価指針¹⁾では，実際に地震後の修復の際に必要な残留ひび割れ幅と，ピーク時ひび割れ幅の関係について 0.5 という数値が示されているが，検討課題としている。

二つ目は，ひび割れを工学的な損傷量としてより客観的に数値化することである。従来，ク

ラックスケールを用いて，ひび割れ幅を測定してきたが，これは測定者の主観が入り正確性にかける可能性があり，これを解消するためデジタル画像を用いた客観的な損傷測定を試みた。

2. 実験の概要

2.1 試験体概要

試験体は図 - 1 に示す様なキャンチレバー型の RC 柱で，横補強筋量と軸力比を実験変数とする。4 体が，それぞれ曲げ卓越型破壊形式から，

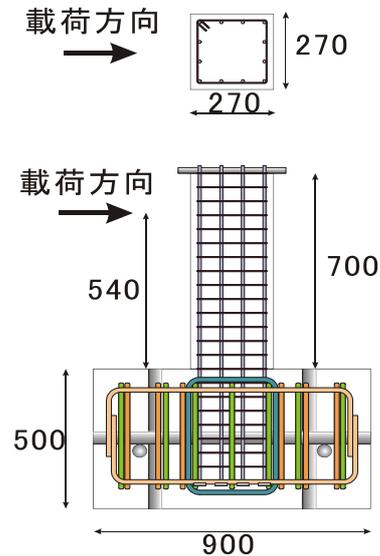


図 - 1 試験体詳細図 (単位:mm)

*1 京都大学 工学研究科建築学専攻 大学院生 (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 計測検査株式会社
 *4 京都大学 工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

せん断卓越型破壊形式となるようこれらを組み合わせさせた。表 - 1 に試験体諸元を示す。軸力比とは、作用させた軸力を、柱の断面積とコンクリート強度の積で割った値である。表 - 2, 3 に各材料の力学的特性を示す。基礎と柱部分は別打ちとし、早強コンクリートを用いた。

表 - 1 試験体諸元

試験体名	主筋		横補強筋		軸力比 N/BDf'c
	配筋	鉄筋比(%)	配筋	鉄筋比(%)	
S6N2	12-D10	1.29	D6@50	0.53	0.2
S4N2			4@50	0.23	
S6N5			D6@50	0.53	
S4N5			4@50	0.23	

表 - 2 鉄筋の材料特性

	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
D10	330	461	165
D6	1076	1281	197
4	567	588	212

表 - 3 コンクリートの材料特性

	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
柱部分	47.3	3.28	25.5
基礎部分	52.9	3.68	32.0

2.2 載荷方法

図 - 2 に示すように、一定軸力と水平方向の正負交番繰り返し静的漸増載荷を行った。載荷は部材角(R)により制御し、図 - 3 に示すように、部材角が $\pm 0.05\%$ 、 $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.2\%$ 、 $\pm 0.3\%$ 、 $\pm 0.4\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 0.6\%$ 、 $\pm 0.8\%$ 、 $\pm 1.0\%$... 各部材角振幅を 2 回ずつ繰り返した。なお、東側に変形する時の荷重、変位を正とする。また、部材角は水平力の載荷点における水平変位をスタブ面からの高さ 560mm で除した値とする。水平力、及び軸力の値は柱の P- 効果を考慮した値である。

S6N2・S4N2 は軸力を保持できなくなった -5.0% 2 回目・-4.0% 2 回目で、S6N5・S4N5 はせん断変形が急激に進行し -3.0% 1 回目・+2.0% 1 回目の時に載荷を終了した。

2.3 スキャナーを用いたひび割れの計測方法

ひび割れ幅は、従来クラックスケールを用い、目視による測定が行われてきた。しかし、この

方法は客観性にかける。そのため今回、デジタル画像による客観的なひび割れ観測を試みた。試験体表面に直接、市販の A4 版イメージスキャナーのガラス面をあて、スタブ面から 1.5D の範囲（以後、柱せいを D とする）を 300dpi の解像度でスキャンした。ただし、デジタル画像による測定より、目視による観測の方が 0.05mm 以下の極初期の微細ひび割れに関しては、発見できたものが多かった。

今回は 1 pixel = 0.08mm の撮影条件でスキャンしたため、0.04mm 以上のひび割れ幅が認識できていると思われる。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

各試験体の破壊性状について以下に示す。また、それぞれの試験体について部材角が 1.0% のサイクル終了時のひび割れ図を、図 - 4 に示す。試験体に描かれているグリッド線は、実線は 70mm 間隔で、鉛直方向の線は柱主筋上に位置

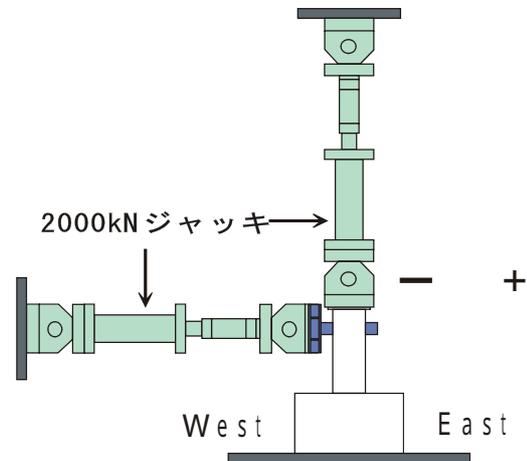


図 - 2 載荷装置図

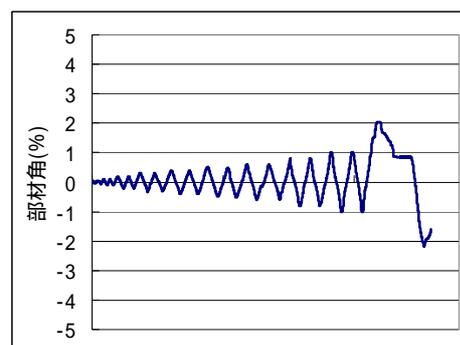


図 - 3 載荷履歴

する。また、点線は横補強筋上に位置する線である。軸力が低く横補強筋量が多い S6N2 は部材角が 0.4% までほぼ曲げひび割れのみであった。部材角が 0.4% になるとひび割れが一気に進行し、曲げせん断ひび割れへと変化した。曲げひび割れから伸びたものではない独立したせん断ひび割れ（以後、ウェブシア-ひび割れ）は、ほとんど入らなかった。

S6N2 に比べ横補強筋量の少ない S4N2 は、部材角が 0.3% までは曲げひび割れのみであったが、曲げせん断ひび割れとが大幅に増加した。

S6N5 は、部材角が 0.3% までは曲げひび割れがほとんど進行せず、せん断ひび割れだけが增加了。部材角が 0.5% で引張鉄筋が降伏し、部材角が 0.6% になると、曲げひび割れが曲げせん断ひび割れへと進行した。しかし、引張主筋より内側に入ったひび割れは、曲げひび割れから進展したものでなく、ほぼウェブシア-ひび割れ

であった。部材角が -1.0% でせん断ひび割れの数が一気に増加し、終局状態ではこれらのせん断ひび割れが急激に広がり、最終的には、部材角が 3.0% でせん断破壊し、カバコンクリートが 1.3D まで剥離した。

S4N5 は、ひび割れの進展は S6N5 とほぼ同様だった。部材角が 0.8% で引張鉄筋が降伏し、最終的に部材角が 2.0% でせん断変形が急激に進行し、せん断破壊した。終局時にはカバコンクリートの剥離が西面で 1.8D まで進み、S6N5 の約 1.4 倍と広範囲にわたった。

3.2 水平荷重 - 部材角の関係

各試験体の部材角 - 水平荷重関係を図 - 5 に示す。グラフ中の の点は引張鉄筋の降伏した点を示す。これを見ると、S6N2 は PC のように十分なエネルギーを消費しながら、残留変形の小さいループを描いた。同じ軸力比の S4N2 も、最大耐力・剛性共に S6N2 とほぼ同じだったが、最大耐力に達した後の履歴ループにおける残留変形は S6N2 より大きかった。これに対し、軸力比 0.48 の試験体 S6N5 と S4N5 は部材角が 2.0% までほぼ同じループを描き、どちらも最大耐力後の耐力低下が著しかった。

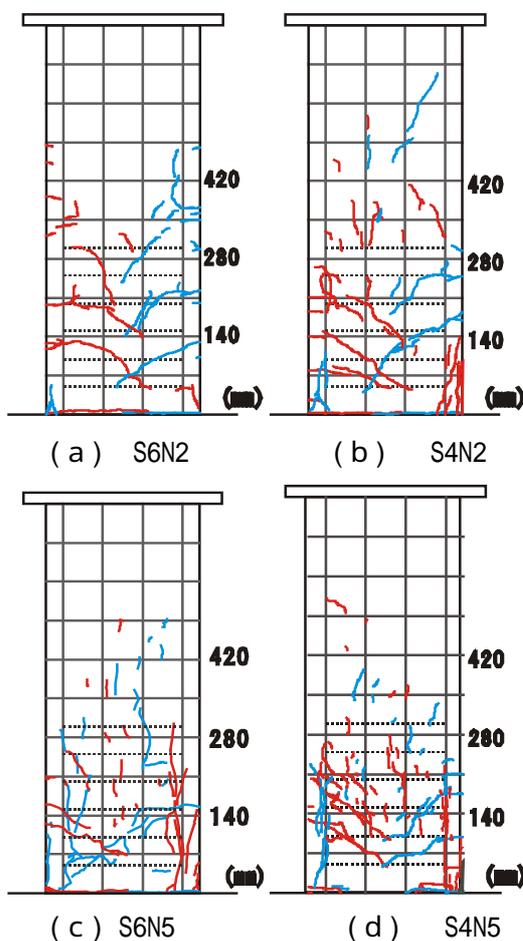


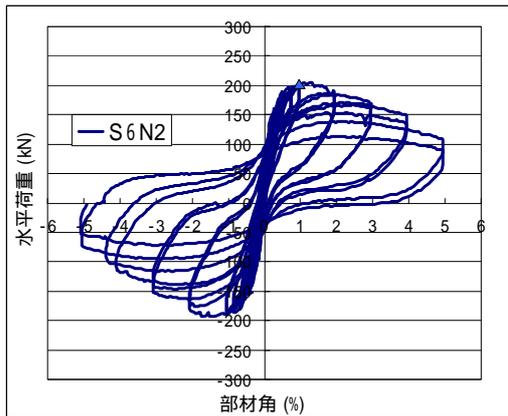
図 - 4 ひび割れ図

表 - 4 曲げ耐力に関する計算値と実験値の比較

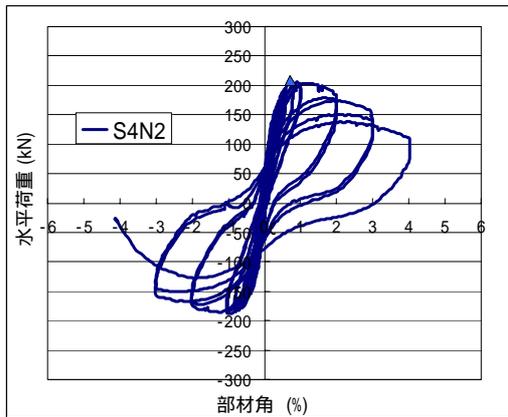
	計算値 (kN)	実験値 (kN)	実験値/計算値 (%)
S6N2 + 側	191	204	107
S6N2 - 側	-191	-192	101
S4N2 + 側	189	205	108
S4N2 - 側	-189	-184	97
S6N5 + 側	273	279	102
S6N5 - 側	-273	-247	90
S4N5 + 側	262	292	111
S4N5 - 側	-262	-286	109

表 - 5 曲げひび割れ発生荷重に関する計算値と実験値の比較

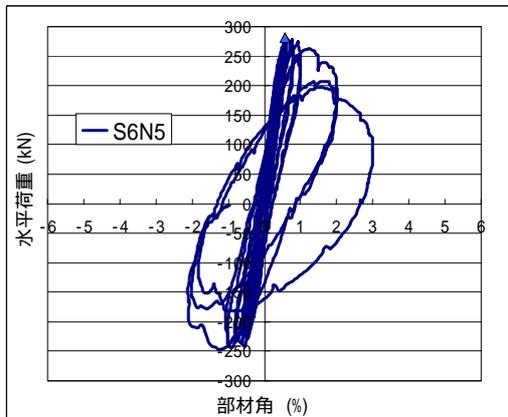
	計算値 (kN)	実験値 (kN)	実験値/計算値 (%)
S6N2 + 側	79	96	122
S6N2 - 側	-79	-42	53
S4N2 + 側	79	90	114
S4N2 - 側	-79	-57	72
S6N5 + 側	155	118	76
S6N5 - 側	-	-	-
S4N5 + 側	155	51	33
S4N5 - 側	-155	-55	35



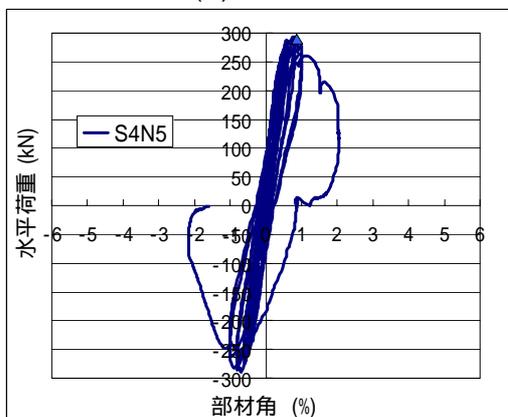
(a) S6N2



(b) S4N2



(c) S6N5



(d) S4N5

図 - 5 水平荷重 - 部材角の関係

曲げ耐力に関して実験値と計算値の比較を表 - 4 に示す。曲げ耐力の算定には靱性保証型設計指針²⁾(解 5.3.2)に示される曲げ終局強度概算式を使用した。すべての試験体において、実験値/計算値がほぼ 10%以内に収まっており、軸力や横補強筋量の違いにかかわらず曲げ終局強度概算式の精度のよさを確認できた。

曲げひび割れ発生荷重の計算値と実験値の比較を表 - 5 に示す。S6N5 の - 側は計測不良のため、データが採取できなかった。また、算定時の引張り強度は $0.56 f'_c$ とした。ひび割れ発生荷重の予測は、ばらつきが大きく、計算値より実験値の方が小さいことが多かった。基礎面と柱部分の境目に入ったひび割れを、最初に確認したひび割れとしたが、今回の試験体では基礎と柱を別打ちとしたことから、部材のひび割れ発生荷重を予測する式では、精度よい予測ができなかったと思われる。

3.3 ひび割れ幅

曲げ破壊支配型の S6N2 と S4N2 の 2 体に着目する。ひび割れの計測は、各部材角において二回目のピーク時と、その後水平荷重除荷時に行った。

(1) クラックスケールによる計測

引張縁と、外側主筋位置の曲げひび割れ、および横補強筋上を横切る主なせん断ひび割れ(曲げせん断ひび割れを含む)の幅を、クラックスケールを用いて計測した。ただし、0.05mm 未満のひび割れ幅は 0 とした。柱の引張縁に最も近い主筋上にあり、目視で確認できる主な曲げひび割れについて、図 - 6 にひび割れ幅と部材角関係、図 - 7 に経験部材角と残留曲げひび割れ幅関係、図 - 8 に経験部材角と残留率関係を示す。

性能評価指針¹⁾は、残留率は 0.5 として残留ひび割れを算出している。しかし、長期荷重程度の軸力比 0.2 試験体では 図 - 8 に示すように、残留率は 0.5 を大きく下回った。軸力比 0.2 の試験体では、部材角が 2.0%未満では曲げひび割れの残留率は両試験体でほぼ 0.2 を下回った。軸力

比 0.48 の試験体のうち S6N5 は、部材角が 1.0% 未満では、残留率が 0.2 を下回った。S4N2 は、残留率は 0.6 まで達したが、これはピーク時の最も広いひび割れ幅でも 0.2mm と大変小さく、測定誤差が大きいためである。そこで、PC 部材や柱部材など、軸力が作用する部材に対しては、残留率を 0.2 程度とすることが可能と思われる。

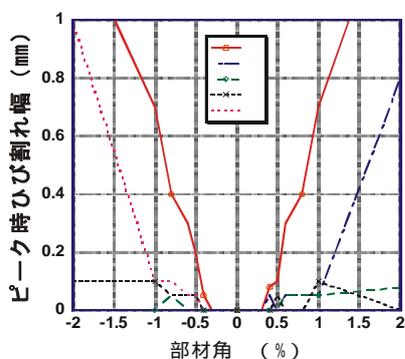
(2) デジタル画像を用いた計測

今回は部材角が -0.3%、-0.5%、-0.8% のそれぞれのサイクルにおいて二回目ピーク時と、その後水平荷重を除荷した時にスキャンした。測定範囲内にあるひび割れについて、その幅ごとに、0 ~ 0.05mm、0.05 ~ 0.1mm、0.1 ~ 0.2mm、0.2 ~ 0.4mm の 4 段階に分類する。個々のひび割れに対し、各段階に分類される部分の長さを計算し、合計して各段階での、ひび割れの総長さを求める。ひび割れ幅として、それぞれ段階ごとの中間の値である 0.025mm、0.075mm、0.15mm、0.3mm を用い、これと各々の総長さの積を、ひび割れ面積とした。これらのデジタル画像処理による

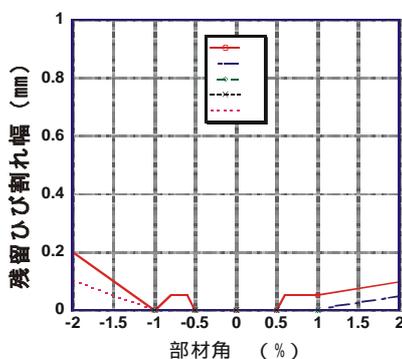
ひび割れと部材角の関係を図 9 に示す。

最大耐力に達する前の、使用限界から修復限界にあたる部材角が 1.0% より小さい範囲では、クラックスケールによるひび割れ幅の観測では部材角の変化による幅の変化や残留率の変化が、あまり見られなかった。しかし、ひび割れ面積を見ると小さな部材角でも違いが出ており、横補強筋量の多い方がひび割れ面積は少ない。

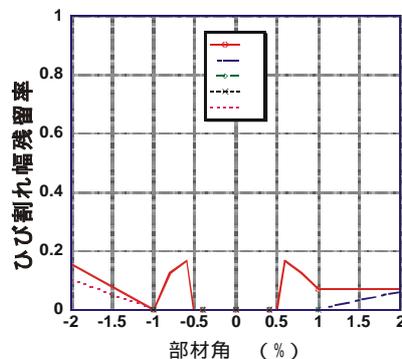
通常部材角が大きくなるにつれて、ひび割れ幅の残留率も大きくなる。しかし、図 - 9(c) を見てみると、ひび割れ面積の残留率は全体の変形が進行するに伴い S6N2、S4N2 共に小さくなってきている。これは、主なひび割れの幅を測定した場合と異なり、柱側面全体をスキャンしたため、除荷時に軸力により完全に閉じる程度の 0.05mm 以下の微細なひび割れについても、ひび割れ面積に入っているためと思われる。また、横補強筋量違いによるひび割れ面積の違いがあまり見られないのは、せん断ひび割れと曲げひび割れを合わせて面積を算出しているためであ



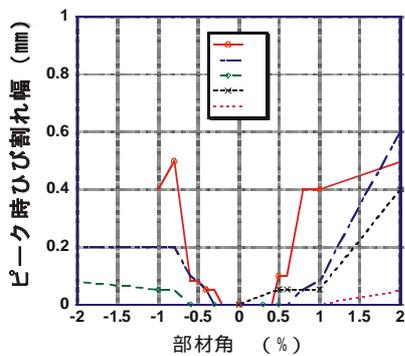
(a) S6N2



(a) S6N2

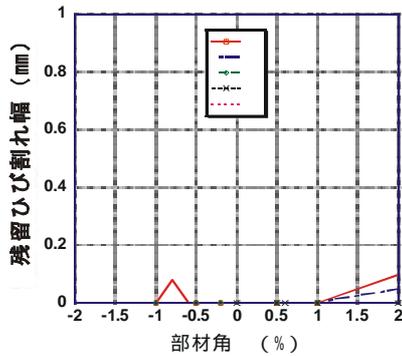


(a) S6N2



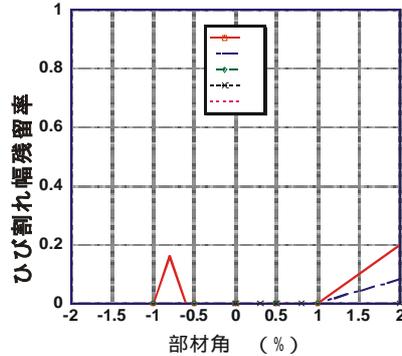
(b) S4N2

図 - 6 部材角とピーク時曲げひび割れ幅関係



(b) S4N2

図 - 7 経験部材角と残留曲げひび割れ幅関係



(b) S4N2

図 - 8 経験部材角と曲げひび割れ幅残留率関係

り、今後はそれぞれを区別して扱う予定である。

ひび割れの幅別に分けた、デジタル画像処理によるひび割れと部材角の関係を図 10 に示す。鉄筋がまだ降伏していない、部材角が 0.8% 以下のこのような場合でも、部材角が大きくなるにつれ、0.05mm 未満のピーク時のひび割れ面積より、0.05~0.1mm・0.1~0.2mm 幅の幅の広いひび割れの面積の方が急激に増加するが、幅が広いひび割れほどよく閉じ、残留率が低いという傾向がある。

4. 結論

以下に、今回の実験から得られた本研究の結論を示す。

- (1) 部材角が 1.0% 未満では、性能評価指針が仮定する残留率 0.5 を大きく下回り、曲げひび割れの残留率はすべての試験体で 0.2 を下回った。軸力が作用する柱部材に対しては、残留率は 0.2 程度にする事が可能と思われる。

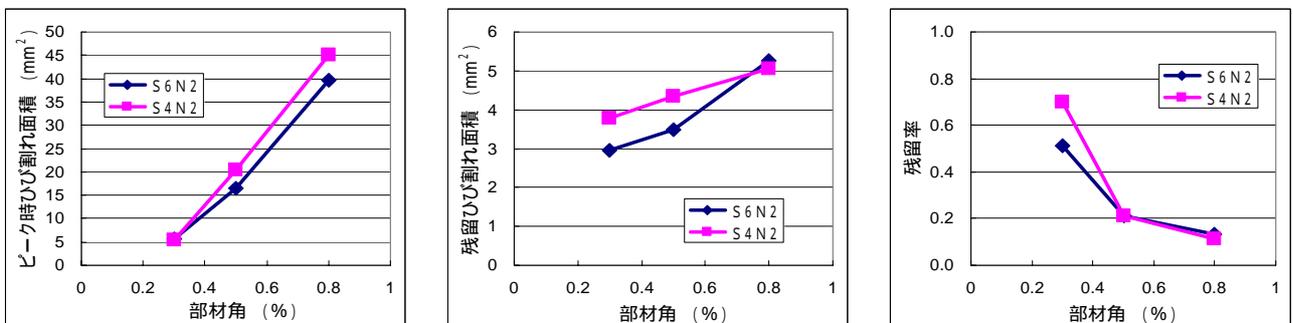
- (2) ひび割れ面積は、使用限界から修復限界にあたる比較的小さな部材角の範囲でも、はっきりと変化が見られ、損傷の指標として有用である。部材角が 1.0% 未満において、経験部材角が大きくなるにつれ、伸びてゆくひび割れ幅の残留率と異なり、ひび割れ面積の残留率は小さくなる傾向が見られた。

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の提供を受けました。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.140-141，第 6 章 2004 年
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，pp.140-141，1999 年

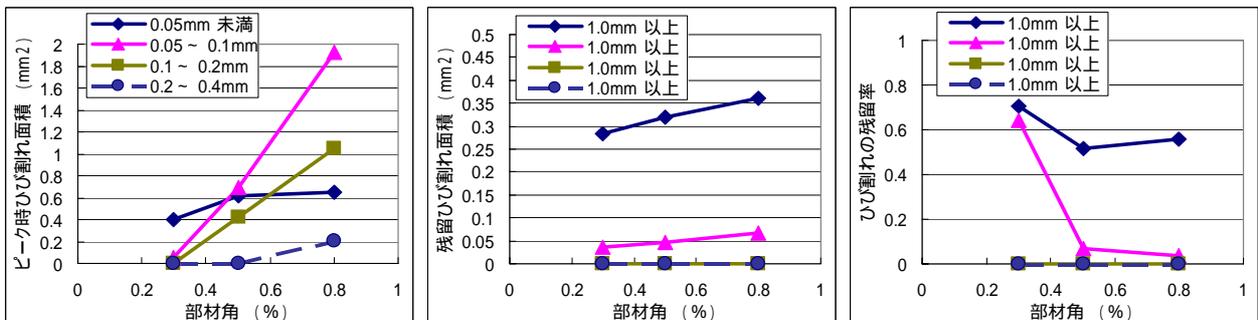


(a) ひび割れ面積と部材角関係

(b) 残留ひび割れ面積と経験部材角関係

(c) ひび割れ面積残留率と経験部材角の関係

図 - 9 デジタル画像処理によるひび割れと部材角の関係



(b) ひび割れ面積と部材角関係

(b) 残留ひび割れ面積と経験部材角関係

(c) ひび割れ面積残留率と経験部材角の関係

図 10 デジタル画像処理によるひび割れと部材角の関係 (ひび割れ幅別)