

論文 曲げせん断加力を受ける鉄筋コンクリート柱のヒンジ領域に発生するひび割れ幅

王 建男^{*1}・岸本 一蔵^{*2}・任 旭^{*3}・大野 義照^{*4}

要旨：地震によるコンクリート部材の損傷評価法の提案を目的として、軸力比および鉄筋径をパラメータとしたRC柱部材の曲げせん断実験を行った。損傷評価指標としてひび割れ幅に着目し、部材変形角の大きさから、部材に発生するひび割れ幅の推定方法を提案し、それを実現するための諸条件について実験結果をもとに考察を行った。

キーワード：RC柱, 損傷評価, 曲げひび割れ, デジタルカメラ

1. はじめに

建築物の耐震設計法では、被災後の使用性や経済的視点からの補修の是非について、被害程度を分類をより細かく規定することによりその判断を容易にしようとする試みが行われてきている。従来、被害程度は一般に建物の層間変形角で代表されることが多く、建物の層間変形角は被害の概括的な判断基準として有用な指標となっている。一方、より詳細に被害程度を分類するためには、部材レベルにおける損傷度を明らかにする必要がある。コンクリート部材では「ひび割れ幅」を指標として用いることが有力と考えられている。2004年に出版された「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⁾においても、各種限界における残留ひび割れ幅の値が示されている。しかしながら同指針に記載されているように地震時被害としての曲げひび割れ幅に関する研究は少なく、同指針に示されている推定値も十分確立されたものとはいえないのが現状である。本論文は、部材損傷の評価指標として、部材に発生するひび割れ幅

を部材の受ける変形角との関係について検討するものである。具体的には、軸力比、主筋径等をパラメータとする柱部材に対する曲げせん断実験を行い、ヒンジ部に発生するひび割れ挙動をデジタルカメラを用いて観察した。その結果を用いて曲げひび割れ発生の状態について検討し、部材変形角から発生する曲げひび割れ幅を導く手法について考察した。

2. 実験概要

対象とした試験体は、1辺25cmの正方形断面を有する部材長100cm(シアスペン比2.0)の5体の柱部材である(図-1,表-1)。各試験体の説明を以下に示す。No.1:基準試験体。No.2:作用軸力が

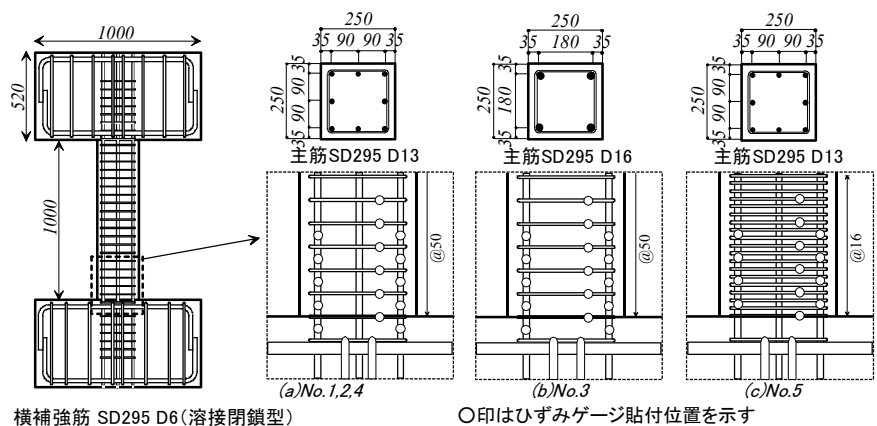


図-1 試験体詳細

*1 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻 (正会員)
 *2 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻 講師 博士(工学) (正会員)
 *3 前田建設工業株式会社
 *4 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻 教授 工博 (正会員)

表-1 試験体一覧表

試験体	主筋	帯筋	補強筋比(P_w)	軸力比
No.1	8-D13	D6 @50	0.51%	0.28
No.2	8-D13	D6 @50	0.51%	0.11
No.3	4-D16	D6 @50	0.51%	0.28
No.4	8-D13	D6 @50	0.51%	0.35
No.5	8-D13	D6 @17	1.50%	0.35

注1:表中の斜線は基準試験体 (No. 1) と異なる部分を示す
注2:鉄筋はすべてSD295

表-2 材料特性

	No.1 No.2 No.3			No.4 No.5		
	降伏強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	ヤング率 [N/mm ²]	降伏強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	ヤング率 [N/mm ²]
主筋 (D16)	349	512	1.67×10^5	—	—	—
主筋 (D13)	323	426	1.62×10^5	359	495	1.76×10^5
帯筋 (D6)	261	413	1.39×10^5	381	513	1.79×10^5
	圧縮強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	ヤング率 [N/mm ²]	圧縮強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	ヤング率 [N/mm ²]
コンクリート	37.6	2.8	2.10×10^4	42.7	2.9	2.43×10^4

低い試験体 (軸力比=0.11 [軸力比=N/($A_c \cdot \sigma_c$): Nは軸力, A_c は柱断面積, σ_c はコンクリート圧縮強度]), No.3: より径の大きな主筋を有する試験体。ただし引張鉄筋量は基準試験体と同じ。No.4: 作用軸力が高い試験体 (軸力比=0.35)。No.5: 作用軸力が高く (軸力比=0.35), かつ, せん断補強筋を多量に施した試験体 (基準試験体の3倍: D6@17mm)。なお, 試験体 No.4, 5については筆者らが既発表の論文²⁾において行った実験である。試験体の一覧を表-1に示す。全ての試験体はせん断耐力³⁾が曲げ耐力⁴⁾よりも大きくなるように設計されており曲げ変形が卓越する部材である。

使用した鉄筋およびコンクリートの材料特性を表-2に示す。載荷時の軸力比は表-1に示すとおりであり, 載荷は建研式加力方式により行った (図-2)。載荷履歴は, 試験体 No.1~No.3は部材角 $R=1/200, 1/100, 1/66, 1/50, 1/40, 1/33$ のそれぞれ1回ずつの正負交番, No.4とNo.5は $R=1/200, 1/100, 1/50, 1/33$ のそれぞれ3回ずつの正負交番とした。部材変形はスタブに設置したひずみ変換式ダイヤルゲージにより, 主筋および横補強筋のひずみは, 図-1(a)~(c)に示す位置に箔ひずみゲージを貼付することにより行った。また, ヒンジ部の挙動を追跡するために, 加力方向と垂直方向の部材面上に固定設置したデジタルカメラ (4,500×3,000ピクセル) による撮影を行った (図-3, 写真-1)。撮影範囲は図-3に示すとおりであ

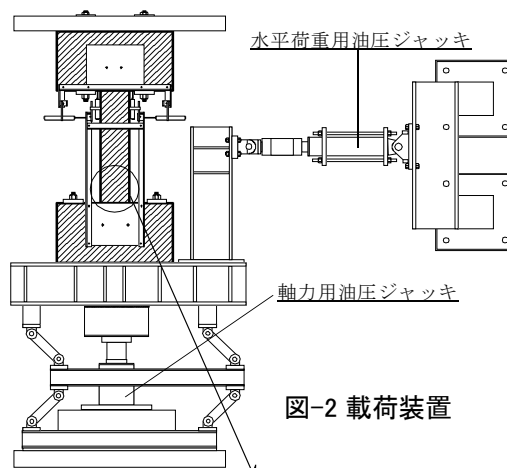


図-2 載荷装置

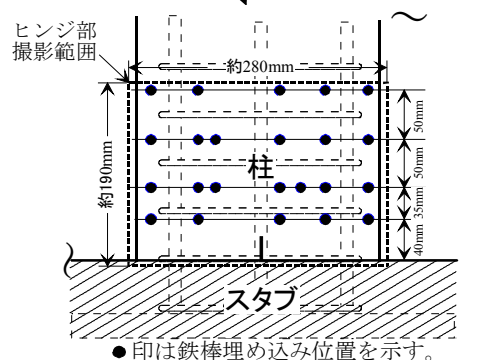


図-3 撮影範囲概略図



図-4 デジタルカメラによる撮影状況 (試験体上部より撮影)

り, 撮影時の解像度はヒンジ部撮影で約0.06mm/dot (=水平方向撮影長さ280mm ÷ 4500dots) である。使用レンズの歪曲収差による画像中央部と端部の誤差はおよそ5%であるが, 結果に対する補正は行っていない。ヒンジ部の動きを測定するために, 部材表面に測定ポイントを設置した。測定ポイントは, 長さ約15cmのφ4の丸鋼をコンクリート打設時に試験体に埋め込み, その先端を円錐状に加工したものである。埋め込み本数は1試験体辺り23本, その位置を図-3中

に●印で示す。

3. 実験結果と考察

図-4 に各試験体のせん断力-変形関係 (P-Def.) 関係を示す。いずれの試験体も文献4での終局曲げ耐力を満足する曲げ変形卓越の試験体であることがわかる。

3.1 部材変形角からひび割れ幅を求めるためのプロセスについて

ここでは「部材変形角からヒンジ部に発生するひび割れ幅を求めるための考え方」について示す。図-5 にひび割れ図を、図-6 に載荷時におけるヒンジ部写真の一例 (No.1 R=1/50 時) を示す。図-6 示されるように、「ひび割れにより分割されたそれぞれのブロックが圧縮側のある領域を中心に回転しており、部材変形の大部分がこのひび割れにより発生する回転角に起因する。」と仮定する。この仮定を基に以下(1)~(4)に示す条件を求める。この条件が求められれば図-7 に示す手順で部材変形角からひび割れ幅を求めることが可能となる。

- (1) ひび割れにより分割されたブロックが回転するときの、中心となる領域 (位置) を特定する。
- (2) ひび割れ発生位置を特定する。
- (3) ひび割れにより発生する回転角の部材変形角に対する割合を特定する。
- (4) 1つの部材において、各位置で発生するひび割れ大

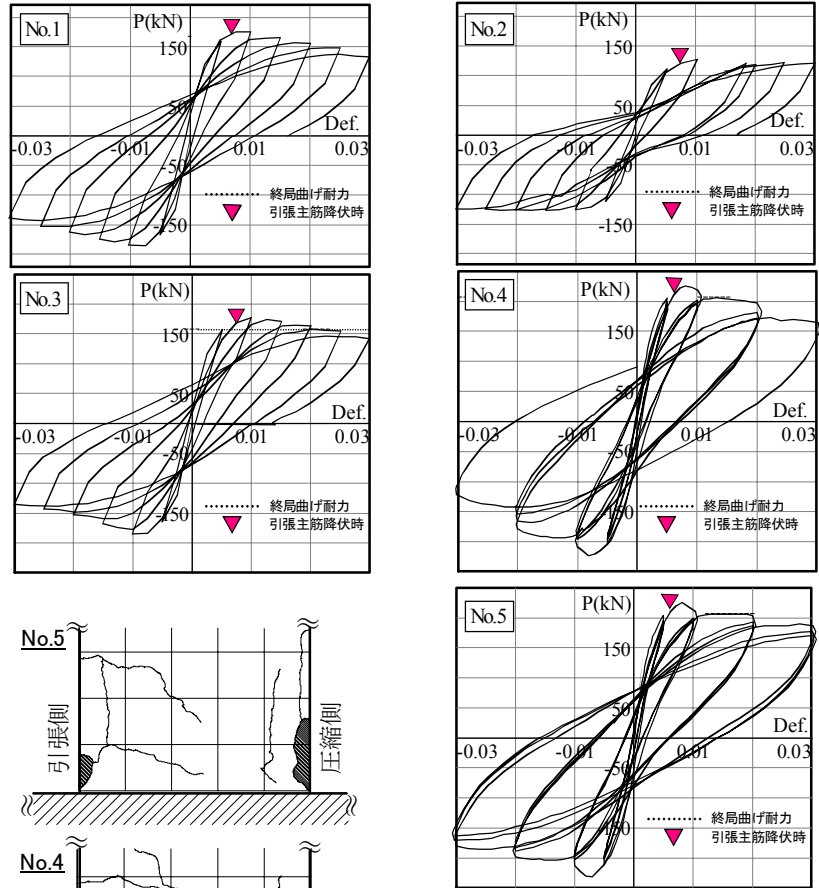


図-4 荷重-変形関係



図-5 ひび割れ図 (R=1/50時)

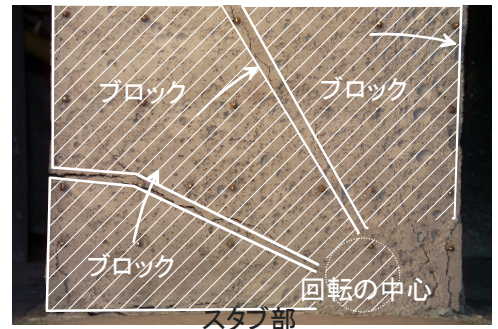


図-6 ひび割れによる回転角の発生

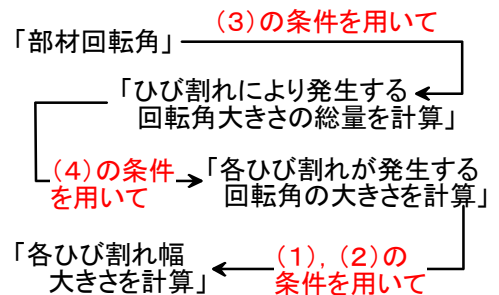


図-7 部材回転角からひび割れ幅を求めるプロセス

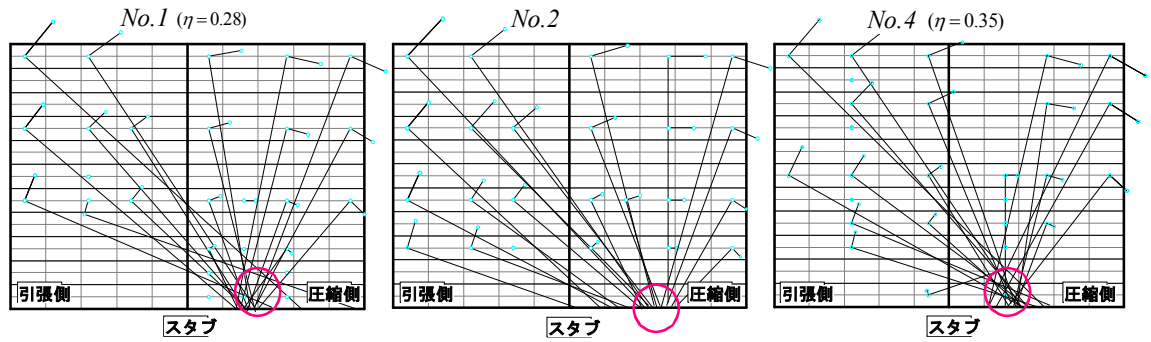


図-8 測定ポイントの移動線を用いた回転の中心位置の推定

$$x_n = \frac{\eta}{k_1 k_3} \dots (1)$$

η : 軸力比
 $k_1 k_3$: ストレスブロック係数(ここでは0.83とする)

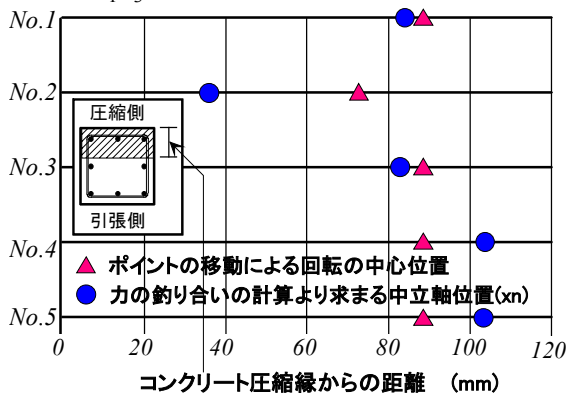


図-9 回転の中心(測定ポイントによる)と計算による中立軸位置(x_n)との比較

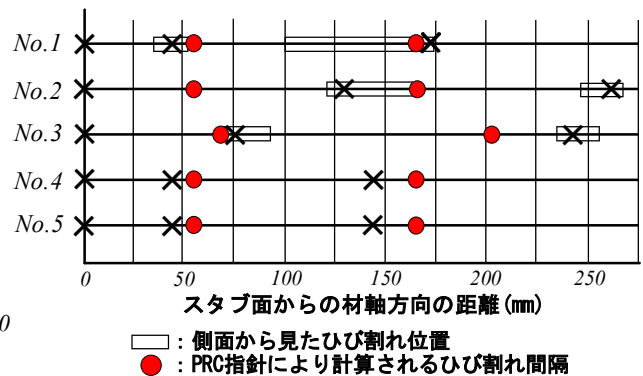


図-10 ひび割れ発生位置(1/200)

きさの割合(ヒンジ部の回転角に及ぼす割合)を特定する。

以下の節では上記の(1)~(4)について検討する。

3.2 回転の中心の特定

図-8に試験体 No.1,2,4 (部材角 $R=1/100$ 時)の測定ポイントの移動線を示す。また、図には、移動線に対する垂線もあわせて示した(各ポイントの移動量は約16倍に拡大して描かれている)。各測定ポイントの垂線の交点にはある程度の広がりがあるものの、いずれの試験体でもほぼ“ある領域”を中心に回転が発生していることが確認できる。これらの回転の中心位置を推定するのに最も適切と考えられる中立軸位置(断面内の力の釣り合いから求まる中立軸位置(x_n):式(1))の値と比較したものが図-9である。同図によると、力の釣り合いから求めた中立軸位置は軸力により大きく変化するのに対し、測定ポイントにより求めた回転中心の位置は作用軸力の大きさに鈍感である

ことがわかる。具体的には、基準試験体($\eta=0.28$)と高軸力比の試験体 No.4,5 ($\eta=0.35$)とは違はなく、軸力が低い No.2 試験体の場合にやや小さい値となるものの、本実験での値は断面せい(約80mm)付近で一定している。

3.3 ひび割れ発生位置の特定

図-10は各試験体のひび割れ発生位置(スタブ面からひび割れ位置までの距離)を示したものである。図中×印は、変形方向に対する側面(測定ポイントがみえる面)での引張縁でのひび割れ位置を示している。変形方向の面(写真-2)に発生するひび割れはある幅をもって発生するためこの範囲を×印を含む長方形で示している。同図より次のような

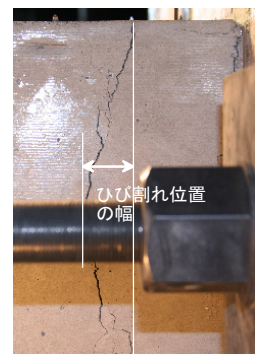


写真-2 側面からみたひび割れ位置

ことがわかる。1)スタブと柱の境界位置では全ての試験体でひび割れが発生している。2) 基準試験体 No.1 ではスタブより約 45mm と 175mm の位置にひび割れがあり、ひび割れ本数は合計 3 本である。3) これに対し太径の鉄筋をもつ No.3 では本数は No.1 と同じく 3 本であるが、ひび割れ間隔は No.1 よりも広く、その位置は約 75mm と 240mm である。4) 軸力の高い No.4,5 試験体は No.1 試験体とほぼ同じひび割れ状況であり、No.4, 5 の違いである補強筋量の違いによる違いはみられない。5) 低軸力比の No.2 試験体は、スタブと柱の境界以外に 1 本 (スタブより 100mm) のひび割れのみが発生している。

また図-10 中には、発生するひび割れ間隔を推定するため、プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種 PC) 構造設計・施工指針・同解説 PRC 指針⁵⁾

(以下 PRC 指針と略記) のひび割れ間隔推定式により計算される値を併記している。PRC 指針に示される算定式は長期荷重によるひび割れを対象としているが、ひび割れ発生メカニズムは短期荷重、長期荷重にかかわらず、「鉄筋応力がコンクリートに伝達され、コンクリートに作用する応力度がひび割れ耐力を越えた時点で発生する」という点で基本的に同じであり、かつ、ひび割れ発生の現象が部材変形時の極初期に起こる現象であるため、その準用が可能であると考へた。PRC 指針により計算されるひび割れ位置は同図中○で示されているが、低軸力比の試験体 No.2 をのぞけば本実験のひび割れ位置とよく一致しているといえる。

3.4 ひび割れにより発生する回転角の部材変形角に対する割合の特定

図-11 は各試験体において、ひび割れにより発生する回転角の部材変形角に占める割合を示している。ひび割れ幅とそれにより発生する回転角の関係は図-12 に示すように幾何学的な関係から求めた。図-11 より、全ての試験体で部材

変形角が大きくなれば、ひび割れにより発生する回転角の割合は大きくなることわかる。しかしながら最も小さい変形角 $R=1/200$ 時でも約 60~80%、 $R=1/50$ 時には約 75~90%といずれの変形時でもその値はかなり大きい。また、軸力比による違いをみると、低軸力比であるほどその割合が大きい傾向がある。これは軸力が大きい場合、圧縮側コンクリートの損傷が大きくなり、そこから発生する変形や、柱の圧縮部がスタブにめり込むことにより発生する変形が大きくなることに起因すると推測される。本実験で用いた軸力の範囲 ($\eta=0.11\sim0.35$) ではその差は 15%程度である。

3.5 各ひび割れ大きさのヒンジ部の回転角に占める割合の特定

表-3 はそれぞれの試験体において、各ひび割れによって発生する回転角の、回転角全体 (全てのひび割れで発生する回転角の総和) に対する比率を $R=1/100$ と $1/50$ 時点において示したものである。これらの値を各ひび割れ別 (スタブと柱の境界のひび割れ (1 本目)、次にスタブに近い位置に発生

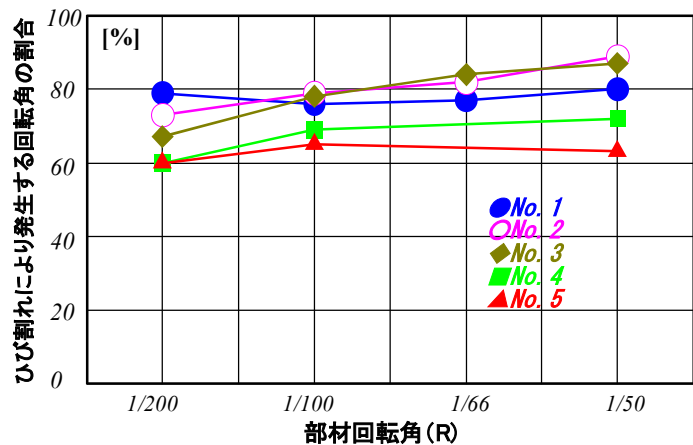


図-11 ひび割れにより発生する回転角の総和が部材変形角に占める割合

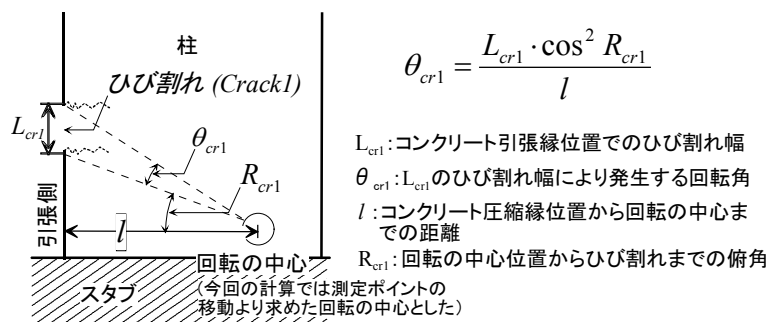


図-12 ひび割れにより発生する回転角の求め方

するひび割れを2本目、更にその次を3本目と呼ぶ)に横軸に軸力比をとり示したものが図-13である。同図によれば、軸力が高いほどスタブと柱の境界位置のひび割れの比率は小さくなる。反対に2本目のひび割れの比率は軸力が高い試験体ほど大きくなっている。

表-3 各ひび割れにより発生する回転角の割合

		1/100	1/50
No.1	境界位置	57	30
	2本目	23	58
	3本目	20	12
No.2	境界位置	73	81
	2本目	27	19
	3本目		
No.3	境界位置	47	42
	2本目	42	50
	3本目	11	8
No.4	境界位置	28	21
	2本目	53	64
	3本目	19	15
No.5	境界位置	17	18
	2本目	57	67
	3本目	26	15

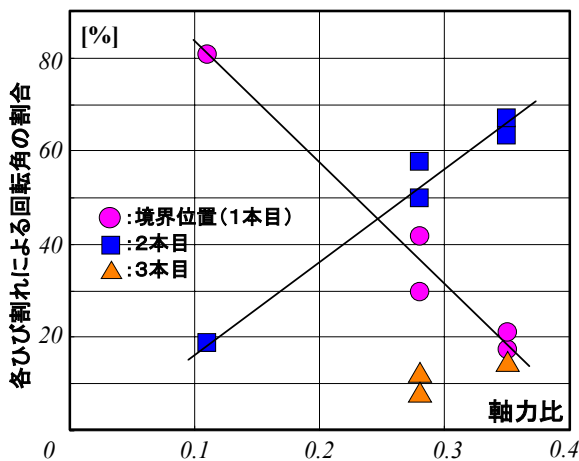


図-13 R=1/50時に各ひび割れにより発生する回転角の割合

4. まとめ

曲げ変形が卓越する RC 柱部材の曲げせん断実験を行い、部材変形角からヒンジ部に発生する曲げひび割れ幅を推定する方法について考察し、以下の知見を得た。

- 1) ヒンジ部に設置した測定ポイントの動きから、ヒンジ部では圧縮側のある領域を中心にヒンジ部が回転していることが確認できた。
- 2) ヒンジ部の回転の中心位置は部材に作用する軸力の大きさにあまり影響を受けず、コンク

リート圧縮縁よりおよそ部材せいの 1/3 程度の位置に存在する。

- 3) ひび割れにより発生する回転角の総和は、その部材の回転角のおよそ 60~90%を占め、軸力比が小さい部材ほど、また部材変形角が大きいほど、その割合は大きくなる。
- 4) スタブと柱の境界位置には必ず曲げひび割れが発生するが、“この位置でのひび割れに起因する回転角”の“部材回転角”におよぼす影響は、軸力比が低いほど大きくなる。逆に、軸力比が大きい試験体では境界位置でのひび割れの次にスタブに近いひび割れの影響が大きくなる。
- 5) スタブと柱の境界位置以外のひび割れ位置については、軸力が高い試験体を除き PRC 指針のひび割れ間隔算定式により比較的よく算定することができる。

本論文は実験の外観的現象だけをとらえて整理したものであり、ひび割れ幅推定手法の方向性とそれについての可能性の説明に留まっている。今後鉄筋ひずみ等のデータをもとに本推定法を理論的に整理し、具体的なひび割れ幅算定方法(残留ひび割れ幅を含む)を検討していく予定である。

[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, 2004.1
- 2) 岸本一蔵・仁科誠治・任旭・大野義昭：多量の横拘束補強を有する RC 柱部材の変形機構, コンクリート工学年次論文報告集, 26 巻 2 号, pp.259-264, 2004.6
- 3) 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(案)・同解説, 1997.7
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999.11
- 5) 日本建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種 PC)構造設計・施工指針・同解説, 1986.10