

論文 せん断破壊型鉄筋コンクリート柱における荷重低下領域での変形と崩壊時変形の関係

中村 孝也*1・芳村 学*2・鹿野 直樹*3

要旨: せん断破壊型 RC 柱を対象とした過去の実験について、崩壊にまで至らない実験は無数にあるが、崩壊まで行った実験は少ない。前者の結果から崩壊水平変形を推定することができれば、崩壊に関するデータを増やす上で非常に有効である。そこで本論では、崩壊まで行った実験結果による水平力-水平変形関係の包絡線を用いて、最大強度以降の荷重低下領域における各荷重段階での水平変形と崩壊水平変形の関係を導き、崩壊にまで至らない過去の実験結果から崩壊水平変形を推定することが可能であることを示した。

キーワード: 鉄筋コンクリート柱, せん断破壊, 荷重低下領域, 崩壊時変形

1. はじめに

既存の古い鉄筋コンクリート (RC) 建物の耐震性能を精度よく評価するためには、せん断破壊型 RC 柱の軸力保持能力喪失時水平変形 (崩壊水平変形) を把握することが重要である。しかし、過去において、崩壊にまで至らない実験は無数にあるが、崩壊まで行った実験 (崩壊実験) は少ない。前者の結果から崩壊水平変形を推定することができれば非常に有効である。

そこで、筆者らがこれまで行ってきた崩壊実験の結果を用いて、包絡線の最大強度以降の荷重低下領域において、各荷重段階における水平変形と崩壊水平変形の関係を導くことを試みた。この関係を定めることができれば、崩壊にまで至らない過去の実験結果から崩壊水平変形を推定することが可能となり、崩壊まで考慮した耐震検討を行うことができる、と考えられる。なお、筆者らが過去に実施した崩壊実験には、加力パスを事前に決めずに過去に記録された地震動を入力して加力する擬似的実験^{1,2)}と、通常の静的実験^{3,4)}が含まれている。これらの二つの荷重方法についてはこれまで区別して扱われてきたが、二つの結果に大きな違いがみられなかったことから、本論では区別せずに検討した。その検討については後述する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体例を図-1に示す。試験体は両端固定形式とした。試験体構造諸元を表-1に、使用材料特性を表-2に示す。試験体は擬似的実験 12 体^{1,2)}、静的実験 17 体^{3,4)}であり、すべてせん断破壊するように設計した。擬似的実験と静的実験を合わせた全 29 体の範囲は、横補

強筋比 $P_w=0.11\% \sim 0.42\%$ 、主筋比 $P_g=1.69\% \sim 2.65\%$ 、軸力比 $\eta=0.17 \sim 0.35$ 、クリアスパン比 $h_0/D=2.0 \sim 4.0$ である。

(1) 擬似的実験

1981 年以前の旧耐震基準で設計された建物を想定し、多層建物中のある 1 つの層を実験対象として他の層は解析で処理するサブストラクチャ擬似的実験を行った^{1,2)}。試験体は実大とし、柱断面寸法 ($b \times D=450 \times 450 \text{mm}$) と内法高さ ($h_0=1,500 \text{mm}$) は共通とした ($h_0/D=3.3$)。図-1に示した試験体は実験 I の例である。擬似的実験の試験体の範囲は、 P_w が $0.11\% \sim 0.42\%$ 、 P_g が 1.70% 、 $\eta=0.17 \sim 0.18$ である。コンクリート強度は $17.9 \text{N/mm}^2 \sim 19.5 \text{N/mm}^2$ であり、鉄筋の降伏強度は $360 \text{N/mm}^2 \sim 410 \text{N/mm}^2$ である (表-2)。

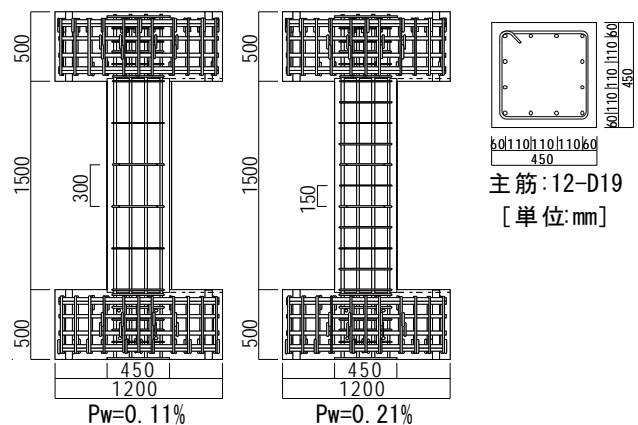


図-1 試験体例 (実験 I)

(2) 静的実験

試験体は旧基準により設計されたものを想定した、実建物の 1/2 程度のサイズを有する柱部材である。柱断面

*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科建築学域助教 博士 (工学) (正会員)

*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科建築学域教授 工博 (正会員)

*3 大成建設 (株) 修士 (工学)

表-1 試験体構造諸元

実験方法	実験No	試験体名	柱内法高さ ho (mm)	断面 b×D (mm)	h ₀ /D	横補強筋比 Pw (%)	主筋比 P _g (%)	軸力比 η	せん断耐力 ¹⁾ V _{su} (kN)	曲げ耐力 ²⁾ V _f (kN)	せん断余裕度 V _{su} /V _f		
擬似動的実験	I	4J11	1500	450×450	3.3	0.11 [2-D10@300]	1.70 [12-D19]	0.17	271	406	0.67		
		4W11							304		0.75		
		4H11											
		6J11											
		4J21											
		4W21											
	6J21												
	II	3F25	1500	450×450	3.3	0.25 [2-D10@125]	1.70 [12-D19]	0.18	309	401	0.77		
		9F25							347		0.86		
		9W25											
9E25													
9F42													
0.42 [2-D10@75]													
静的実験	III	No. 1	1200	300×300	4.0	0.21 [2-D6@100]	2.65 [12-D16]	0.20	177	241	0.73		
		No. 2							167	241	0.69		
		No. 3							161	241	0.67		
		No. 4							0.30	197	276	0.71	
		No. 5							0.35	207	288	0.72	
	IV	N18M	900	300×300	3.0	0.21 [2-D6@100]	2.65 [12-D16]	0.18	183	282	0.65		
		N18C							199	321	0.62		
		N27M											
		N27C											
	V	2M	600	300×300	2.0	0.21 [2-D6@100]	2.65 [12-D16]	0.19				225	432
		2C							242	491	0.49		
		3M											
		3C											
		2M13						1.69 [12-D13]				211	320
		2C13											
	VI	C13	900	300×300	3.0	0.11 [2-D6@200]	2.65 [12-D16]	0.20	175			302	0.58
		C16							165	239	0.69		

1)荒川 min 式。2)曲げ耐力略算式による曲げ降伏時せん断力⁵⁾。

寸法 (b×D =300×300mm) は共通であり、内法高さ h₀ は 600mm, 900mm, 1200mm の 3 種類である (h₀/D=2.0, 3.0, 4.0)。静的実験の試験体の範囲は、P_w が 0.11%~0.21%, P_g が 1.69%~2.65%, η が 0.18~0.35 である。コンクリート強度は 25.2N/mm²~30.7N/mm² であり、鉄筋の降伏強度は 350 N/mm²~402N/mm² である (表-2)。

2.2 加力概要

加力にはパンタグラフにより上部スタブの平行が保持される逆対称加力装置を用いた。鉛直アクチュエーターにより所定の軸力を加えた後、水平アクチュエーターにより水平力を加え、最終的に柱が軸力保持能力を喪失して崩壊するまで加力した。なお、鉛直アクチュエーターには崩壊時に鉛直変形 (縮み) が急増することに備えて50mmのリミットを設け、崩壊するとこのリミッターが作動して実験が強制終了されるようにした。

(1) 擬似動的実験

入力には5種類の観測地震動を用いた。これらは、神戸海洋気象台NS波と大阪ガス葺合供給所N330E波 (1995年兵庫県南部地震)、涌谷町EW波 (2003年宮城県の地震)、八戸市役所N254E波 (1994年三陸はるか沖地震)、EI

表-2 使用材料特性一覧

実験No.	鉄筋		コンクリート 圧縮強度(N/mm ²)
	呼び名	降伏強度(N/mm ²)	
I	D19	403	19.5
	D10	360	
II	D19	410	17.9
	D10	377	
III	D16	402	30.7
	D6	392	
IV	D16	380	26.5
	D6	375	
V	D16	396	25.2
	D13	350	
	D6	392	
VI	D16	391	28.4
	D13	392	
	D6	366	

Centro NS波 (1940年Imperial Valley地震) であり、地震動レベルを最大速度29.2から132cm/sの範囲で変化させて入力した^{1),2)}。各地震動の継続時間は14秒とした。実験時にはひび割れ観察のために加力を停止することは行わず、一定間隔で継続して加力した。減衰は初期剛性比例型で減衰定数を1%とした。

表-3 載荷履歴 (静的実験)

試験体名	載荷履歴	
N18M, N27M, 2M, 3M, 2M13	単調載荷	
N27C, 3C	水平変形 ±0.5%, ±1.0%	を各1サイクル, その後押し切り
No.1~5, C13, C16	水平変形 ±0.5%, ±1.0%, ±2.0%	を各1サイクル, その後押し切り
N18C, 2C, 2C13	水平変形 ±0.5%, ±1.0%, ±2.0%, ±3.0%, ±4.0%	を各1サイクル, その後押し切り

表-4 実験結果一覧

実験No.	試験体名	最大耐力 (kN)	崩壊水平変形 (%)	耐力低下時水平変形 (%)								
				80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	
擬似動的実験	I	4H11	395	4.48	0.77	0.77	0.77	0.77	1.11	1.43	2.14	2.99
		4J11	413	3.29	0.76	0.76	0.76	0.76	1.38	1.96	2.64	2.71
		4W11	432	2.40	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	1.32	1.48	1.94
		6J11	436	3.24	0.72	0.72	0.72	0.72	1.06	1.90	1.99	1.99
		4J21	447	5.39	2.13	2.34	2.87	3.27	4.07	4.20	4.20	4.46
		4W21	429	2.96	1.12	1.12	1.31	1.50	1.50	1.98	2.13	2.68
	II	6J21	434	3.07	0.79	0.94	0.99	0.99	1.44	1.90	2.79	2.86
		3F25	425	15.97	0.47	2.32	2.32	2.88	4.32	5.68	7.31	9.98
		9F25	392	4.94	0.78	1.66	1.96	2.56	2.99	3.67	4.15	4.42
		9W25	437	4.09	1.39	2.03	2.17	2.92	2.97	3.16	3.16	3.16
		9E25	458	6.51	0.50	1.45	1.55	1.55	3.52	3.52	4.17	6.02
		9F42	462	12.57	1.18	2.10	2.10	2.10	5.92	5.92	9.30	12.57
静的実験	III	No. 1	231	13.43	1.32	1.32	1.88	3.56	3.56	7.47	11.04	13.34
		No. 2	224	5.43	1.28	1.28	1.28	1.80	3.45	3.73	4.24	5.17
		No. 3	225	2.02	1.11	1.11	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02
		No. 4	253	2.01	0.74	0.90	0.95	1.03	1.03	1.23	1.60	1.60
		No. 5	265	2.02	1.32	1.39	1.52	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02
	IV	N18M	263	10.29	1.02	1.27	1.63	2.18	3.24	4.40	6.20	7.99
		N18C	264	20.58	1.51	2.01	3.05	4.02	5.13	10.07	11.37	16.74
		N27M	288	4.68	1.44	1.44	1.44	1.44	1.90	3.25	3.57	4.25
		N27C	263	2.97	0.79	0.90	1.00	1.80	1.91	2.23	2.57	2.97
	V	2M	231	11.15	0.94	0.99	1.32	2.22	3.09	4.74	6.61	7.95
		2C	231	7.81	1.18	1.18	1.41	2.41	2.88	5.01	6.30	6.30
		3M	244	5.64	0.82	0.82	0.95	1.14	1.70	2.59	2.99	3.38
		3C	261	5.25	1.00	1.17	1.17	1.75	2.61	3.46	4.07	4.88
		2M13	248	4.14	0.75	0.75	0.98	1.34	1.83	3.05	3.39	3.56
		2C13	258	3.00	1.64	1.64	1.79	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89
	VI	C13	235	1.28	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
		C16	221	5.61	0.96	0.96	1.45	1.85	2.00	2.00	4.45	4.45
	耐力低下時水平変形に対する崩壊水平変形の比の平均				6.58	4.76	4.07	3.27	2.39	1.78	1.45	1.26
	標準偏差				6.18	2.64	1.95	1.49	0.90	0.56	0.38	0.33
	変動係数				0.94	0.55	0.48	0.46	0.38	0.31	0.26	0.26

(2) 静的実験

使用した4種類の載荷履歴を表-3に示す。載荷履歴は、兵庫県南部地震のような直下型地震を主に想定しているため、単調載荷あるいは比較的少数回の繰り返し載荷を行った後に正方向に押し切る載荷としている。

3. 実験結果とその検討

3.1 実験結果

擬似動的実験と静的実験の結果を表-4に示す。耐力低下時水平変形については後述する。本研究における「崩壊」とは柱が軸力保持能力を喪失する現象を意味し、

「崩壊水平変形」は加力開始から終了時までを得られた最大の水平変形とする。実験の結果、全ての試験体がせん断破壊あるいは曲げ降伏後せん断破壊し、最終的に前述した鉛直変形のリミッターにより実験を終了した。ほとんどの試験体が最大水平変形時に軸力保持能力を喪失して崩壊したが、繰り返しの途中で崩壊したものも含まれている(表-4で、9F42, No.3, No.4, No.5, 2C13, C13の6体は繰り返しの途中で崩壊した)。

3.2 耐力低下時水平変形と崩壊水平変形の関係

(1) 検討方法

本研究では、水平力-水平変形関係の包絡線における

最大耐力以降崩壊に至るまでの耐力低下領域を検討対象とする。たとえば、最大耐力の80%に耐力が低下した時点の耐力を耐力割合80%時耐力、その時の水平変形を耐力割合80%時水平変形と定義し、同様に、包絡線の最大耐力以降において耐力割合80~10%時水平変形を耐力割合10%刻みで定義し(80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10%), それらと崩壊水平変形の関係を検討した。

例として、実験IIの9F25の場合を図-2に示す。9F25は、最大耐力が392kNであった。よって、耐力割合80%時耐力は313.6kNとなり、包絡線においてその値に近いプロットの時点の水平変形を耐力低下80%時水平変形とした。同様に、70%~10%の耐力低下時水平変形を定義した。

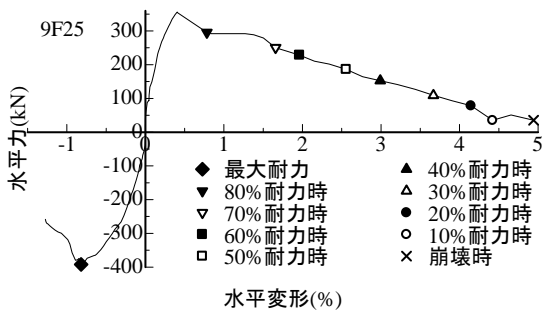


図-2 水平力-水平変形関係の包絡線(9F25)

(2) 耐力低下時水平変形と崩壊水平変形関係

各検討耐力において、耐力低下時水平変形と崩壊水平変形の比をとり、その比から、平均と標準偏差、変動係数を求めた。それらの値を表-4に示す。この変動係数より、各検討耐力における耐力低下時水平変形と崩壊水平変形の比の、平均からのばらつきを検討した。

ここで、次に示すように、耐力低下時水平変形と崩壊水平変形の比の平均について擬似動の実験と静的実験を比較すると、耐力割合が大きい範囲では違いが見られたものの、小さい範囲では結果に大きな違いが見られなかった。耐力割合が小さい範囲の例として、図-3に耐力割合20%時水平変形と崩壊水平変形の関係について擬似動の実験と静的実験の結果を示す。耐力割合20%時水平変形と崩壊水平変形の比の平均は擬似動の実験では1.50、静的実験では1.41であり、同程度の値であった。その比の変動係数は擬似動の実験で0.22、静的実験で0.29であり、これも同程度の値であった。通常、加力は最大耐力と比較して小さな耐力割合まで行うため、以降の検討では動の実験・静的実験の区別なく検討した。

全試験体について、図-4に各検討耐力における耐力低下時水平変形に対する崩壊水平変形の比の平均、図-5にその比と標準偏差より算出した各検討耐力における

変動係数を示す。

表-4に示すように比の平均は、耐力割合80%時で6.58、70%時で4.76、60%時で4.07、50%時で3.27、40%時で2.39、30%時で1.78、20%時で1.45、10%時で1.26と、耐力割合が低いほど小さい値となった。

変動係数は、耐力割合80%時で0.94、70%時で0.55、60%時で0.48、50%時で0.46、40%時で0.38、30%時で0.31、20%時で0.26、10%時で0.26と、耐力割合が小さいほど小さくなった。

耐力低下時水平変形と崩壊水平変形関係を、全試験体について図-6に示す。これより、高い耐力割合ではばらつきが大きい、低い検討耐力ではばらつきが小さくなり、低い耐力割合の方が崩壊水平変形を精度よく推定できる様子がわかる。

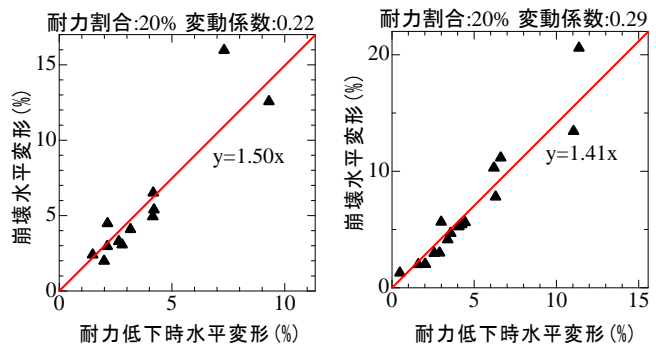


図-3 耐力低下時水平変形と崩壊水平変形

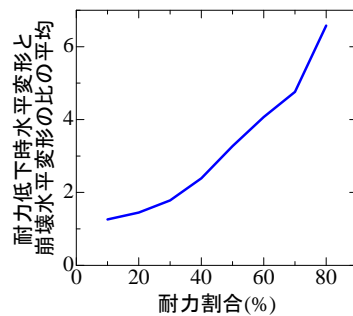


図-4 耐力低下時水平変形と崩壊水平変形の比の平均

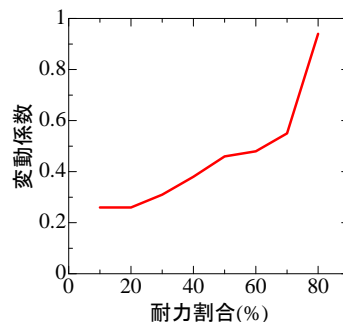


図-5 各耐力割合における比の変動係数

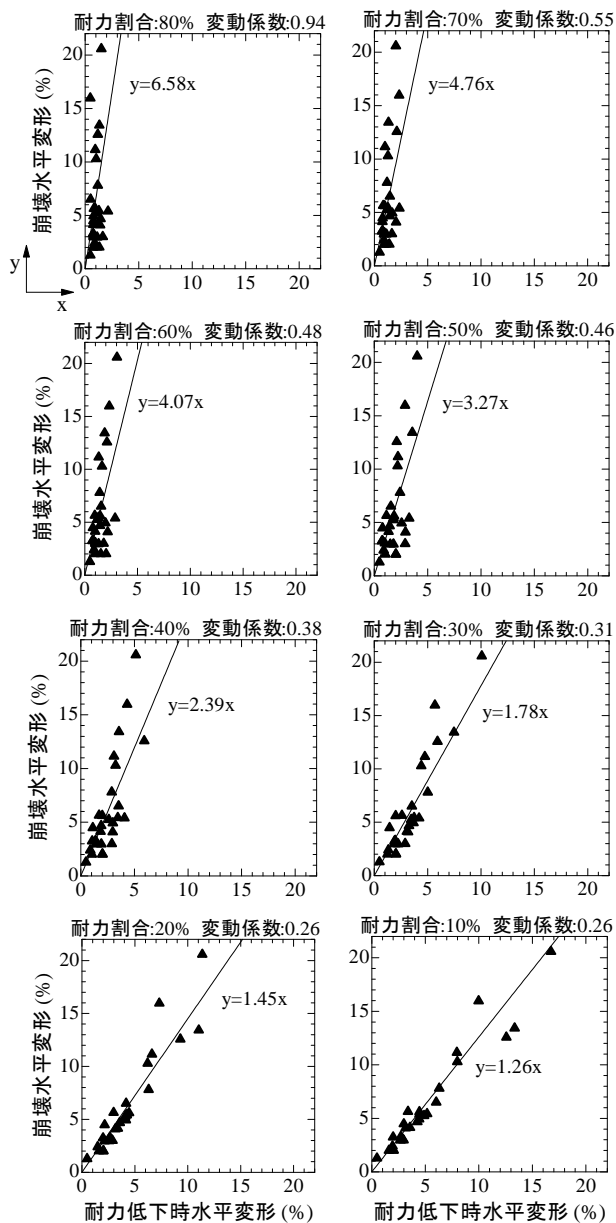


図-6 耐力低下時水平変形と崩壊水平変形

(3) 崩壊水平変形推定

耐力低下時水平変形に対する崩壊水平変形の比の平均を用いて崩壊水平変形を推定した。表-5 は計算結果より推定される崩壊水平変形（予想崩壊水平変形）と実際の崩壊水平変形の比を各試験体において算出したものである。低い検討耐力ほど予想崩壊水平変形と崩壊水平変形の比が 1 に近い値となり、精度よく崩壊水平変形を推定するためには耐力割合が小さい範囲で検討する必要があることがわかった。

3.3 精度良く推定できる範囲

ある程度の精度（ここでは、耐力低下時水平変形と崩壊水平変形の比の変動係数を約 0.30 とする）で耐力低下時水平変形より崩壊水平変形を推定するためには、包絡線において耐力低下割合を 30% 以下とする必要があるこ

表-5 崩壊水平変形と予想崩壊水平変形の比

実験 No	試験体名	崩壊水平変形/予想崩壊水平変形							
		80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
I	4H11	0.89	1.23	1.44	1.79	1.69	1.76	1.45	1.19
	4J11	0.66	0.91	1.06	1.32	1.00	0.94	0.86	0.96
	4W11	0.42	0.58	0.67	0.84	1.15	1.03	1.13	0.99
	6J11	0.68	0.94	1.10	1.37	1.28	0.96	1.12	1.29
	4J21	0.38	0.48	0.46	0.50	0.55	0.72	0.89	0.96
	4W21	0.40	0.55	0.55	0.61	0.83	0.84	0.96	0.88
II	6J21	0.59	0.68	0.76	0.95	0.89	0.91	0.76	0.85
	9F25	0.96	0.63	0.62	0.59	0.69	0.76	0.82	0.89
	9W25	0.45	0.42	0.46	0.43	0.58	0.73	0.90	1.03
	9E25	1.97	0.94	1.03	1.29	0.77	1.04	1.08	0.86
III	9F42	1.62	1.26	1.47	1.83	0.89	1.19	0.93	0.79
	No. 1	1.55	2.14	1.76	1.16	1.58	1.01	0.84	0.80
	No. 2	0.64	0.89	1.04	0.93	0.66	0.82	0.89	0.84
	No. 3	0.28	0.38	0.25	0.31	0.42	0.56	0.69	0.79
	No. 4	0.41	0.47	0.52	0.60	0.81	0.92	0.87	1.00
IV	No. 5	0.23	0.30	0.33	0.31	0.42	0.56	0.69	0.79
	N18M	1.53	1.71	1.55	1.44	1.33	1.31	1.15	1.02
	N27M	0.50	0.69	0.80	1.00	1.03	0.81	0.91	0.88
V	N27C	0.57	0.70	0.73	0.51	0.65	0.75	0.80	0.79
	2M	1.80	2.36	2.08	1.54	1.51	1.32	1.17	1.11
	2C	1.01	1.40	1.36	0.99	1.14	0.88	0.86	0.99
	3M	1.05	1.45	1.46	1.51	1.39	1.22	1.31	1.33
	3C	0.80	0.94	1.10	0.92	0.84	0.85	0.89	0.85
	2M13	0.84	1.16	1.04	0.95	0.95	0.76	0.84	0.92
VI	2C13	0.28	0.39	0.41	0.32	0.44	0.58	0.72	0.83
	C13	0.40	0.56	0.65	0.82	1.12	1.49	1.84	2.12
	C16	0.89	1.23	0.95	0.93	1.17	1.57	0.87	1.00

とが、図-5、図-6 よりわかる。このことは、耐力割合が 30% 以下となるまで加力されている実験では、変動係数 0.3 程度の精度で崩壊水平変形を推定できることを示している。図-4、図-6 より、崩壊水平変形は、耐力割合が 30% の場合そのときの水平変形の約 1.8 倍、耐力割合が 20% の場合は同じく約 1.5 倍、耐力割合が 10% の場合は同じく約 1.3 倍、と考えることができる。

4. まとめ

過去に行った鉄筋コンクリート柱の擬似動的実験と静的実験の結果を用いて、耐力低下時水平変形と崩壊水平変形の関係を求めた。検討対象試験体の範囲は、 $P_w=0.11\% \sim 0.42\%$ 、 $P_g=1.69\% \sim 2.65\%$ 、 $\eta=0.17 \sim 0.35$ 、 $h_0/D=2.0 \sim 4.0$ である。本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- 1) 耐力低下時水平変形と崩壊水平変形の比の平均は、耐力割合 80~10% に対して、6.58, 4.76, 4.07, 3.27, 2.39, 1.78, 1.45, 1.26 と、耐力割合が小さいほど小さくなった。また、比の変動係数は耐力割合 80~10% に対して、0.94, 0.55, 0.48, 0.46, 0.38, 0.31, 0.26, 0.26 となり、耐力割合が小さいほど小さくなった（ばらつきが少なくなった）。

- 2) 比の変動係数を 0.30 程度以下とするためには、耐力割合を 30%以下とする必要がある。このことは、耐力割合が 30%以下となるまで加力されている実験では、ある程度の精度（耐力低下時水平変形と崩壊水平変形の比の変動係数が 0.30 程度以下）で崩壊水平変形を推定できることを示している。崩壊水平変形は、耐力割合が 30%の場合そのときの水平変形の約 1.8 倍、耐力割合が 20%の場合は同じく約 1.5 倍、耐力割合が 10%の場合は同じく約 1.3 倍、と考えることができる。

なお本研究では、軸力比、鉄筋量、載荷履歴などの各因子が耐力低下時水平変形と崩壊水平変形の関係に及ぼす影響については検討していないが、これに関しては今後の検証が必要である。

参考文献

- 1) 城石和寛, 中村孝也, 芳村学, 鹿野直樹: 擬似動的的手法による RC モデル建物の中間層崩壊実験(その 1, その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.245-248, 2009.8
- 2) 中村孝也, 芳村学, 近藤隆幸: 擬似動的的手法による古い鉄筋コンクリート柱の崩壊実験, 構造工学論文集, vol.55B, pp.369-376, 2009.3
- 3) 芳村学, 高稲宜和: 崩壊変形を含む鉄筋コンクリート柱の荷重低下域における挙動の定式化, 日本建築学会構造系論文集, 第 587 号, pp.163-171, 2005.1
- 4) 金 紅日, 芳村学, 中村孝也: せん断破壊型 RC 柱の崩壊に関する直交壁の影響, コンクリート工学年次論文集, 第 27 巻, 第 3 号, pp.193-198, 2005.6
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999