

論文 RC 梁部材の塑性変形性能とエネルギー吸収能力の相関について

島津 勝^{*1}・松本 豊^{*2}・栗原 和夫^{*3}

要旨: 繰返し荷重を受ける RC 梁部材の既往実験結果を基に、塑性変形性能とエネルギー吸収能力について、特に最大耐力時の両者の関係に着目して検討し、さらに荷重履歴特性およびせん断余裕度との関係についても検討した。その結果、既往実験結果から得られた包絡線における塑性率と累積履歴曲線における累積履歴吸収エネルギーとは放物線的な関係になることを示した。さらに、本研究で利用した既往実験結果において、本論で定義した塑性率と履歴吸収エネルギーがせん断余裕度で概ね評価でき、曲げ破壊型梁部材の塑性率に対する累積履歴吸収エネルギーの割合が荷重履歴特性とせん断余裕度に依存することを示した。

キーワード: RC 梁, 繰返し荷重, 塑性率, 履歴吸収エネルギー

1. はじめに

建築構造物の耐震設計は、終局強度型設計法¹⁾から靱性保証型設計法²⁾へと発展し、大地震による塑性化を考慮して、強度だけでなく靱性の確保も要求されるようになってきた。このような靱性に依存する設計法では、任意に設定した限界値での構造物の応答を求め、その点での部材の塑性変形量もしくはエネルギー吸収量が部材の保有性能を下回っていることを確認しなければならない。すなわち、構造物の塑性変形能力やエネルギー吸収能力を定量的に評価し得る算定式によって、構造物に想定される地震外力に対して部材が適切な性能を保有していることを確認する必要がある。RC 構造物の設計においては、限界値として変形量を採用することが多く、エネルギー吸収量を設定する手法は確立されていない。

これまで、繰返し荷重を受ける RC 梁部材の履歴性状に関する数多くの実験的研究^{3)~14)}が行われてきた。その中にはエネルギー吸収能力に関する研究もある。渡辺ら³⁾は RC 梁部材の繰返し荷重実験を実施し、主筋降伏時の荷重と変形角で無次元化した実験データを用いて、エネルギー吸収能力がせん断余裕度により概ね評価できることを示している。向井ら⁴⁾⁵⁾は繰返し荷重を受ける RC 梁部材の軸方向変形またはヒンジ領域におけるせん断変形によって安全限界点を設定し、荷重履歴特性を考慮した安全限界点までのエネルギー吸収量算定式を提案している。しかし、いまだ限界点の設定方法とエネルギー吸収量の算定方法に関しては未解明な部分が残っている。

そこで、本研究では繰返し荷重を受ける RC 梁部材に関して、特に最大耐力に達するまでの塑性変形性能とエネルギー吸収能力に着目して、既往実験結果^{6)~14)}のデータを整理しデータベースを構築し、両者の相関性と載

荷履歴特性等の各種パラメータとの関係について検討する。

2. RC 部材の保有性能の定義

本研究で対象とする部材は梁材、荷重方法は正負両側に同一変位振幅を与える変位漸増型、破壊形式は曲げ破壊、せん断破壊および付着破壊である。部材の保有性能として、既往実験結果の荷重履歴曲線を基に得られた包絡線と累積履歴曲線における塑性率及び履歴吸収エネルギー量を用いる。

図-1 に既往実験結果から得られる荷重履歴曲線の一例を示す。本研究では、各実験結果を統一的に整理するために、実験の荷重履歴曲線をせん断力 Q ~ 変形角 R 関係に換算し、さらに、 Q と R を降伏荷重 Q_y と降伏変形角 R_y で除して無次元化している。無次元化荷重 Q/Q_y の算定には式(1)¹⁵⁾を、無次元化変形角 R/R_y の算定には式(2)の菅野式を使用する。ここで、 $R/R_y=1$ は引張鉄筋が降伏した時点を示す。

$$Q_y = (7d/8l) \times a_t \times \sigma_y \quad (1)$$

$$R_y = Q_y / (\alpha_y \cdot K_e \cdot l) \quad (2)$$

ここで、

$$\alpha_y = (0.043 + 1.64n \cdot p_t + 0.043l/D)(d/D)^2$$

$$K_e = \begin{cases} 3E_c I_e / l^3: \text{片持ち梁形式} \\ 12E_c I_e / l^3: \text{逆モーメント加力形式} \end{cases}$$

a_t : 引張り鉄筋の総断面積, σ_y : 鉄筋の降伏強度

d : 有効梁せい, l : シアスパン長さ, D : 梁せい

α_y : 降伏時の剛性低下率, n : ヤング係数比

p_t : 引張鉄筋比, K_e : コンクリートの剛性

E_c : コンクリートのヤング係数

I_e : 鉄筋を考慮した等価断面二次モーメント

*1 崇城大学 工学部建築学科助教 博士(工学) (正会員)

*2 ㈱エス・ユー・アイ構造設計事務所 修士(工学) (正会員)

*3 崇城大学 名誉教授 工博

降伏変形評価法に関する研究は数多く行われており、せん断変形や主筋の抜け出しによる付加変形を考慮した評価式、高強度材料に対応した評価式等、様々な式^{16)~18)}が提案されている。しかし、日本建築学会の RC 規準¹⁵⁾には、それらを包含した評価式が示されていない。

本研究では既往実験結果を整理しデータベース化するための指標が必要であるため、降伏変形評価式として RC 規準¹⁵⁾に記載されている式(2)を使用する。

コンクリートのヤング係数算出に際しては、シリンダー強度が 36N/mm^2 以下の試験体には RC 規準¹⁵⁾の(解 5.1)式を使用し、 36N/mm^2 より大きい場合には RC 規準¹⁵⁾の(解 5.2)式を採用している。

図-2 に載荷履歴曲線から得られる包絡線を示す。この包絡線は、図-1 の載荷履歴曲線において、全てのループの最も外側の点を連ねたものである。この包絡線の最大荷重に至るまでの無次元化変形角 R/R_y を塑性率 μ_a と定義する。ここで、 μ_a は正側 μ_a^+ と負側 μ_a^- の和である。また、最大荷重時までの総面積 E_a は、無次元化履歴吸収エネルギー量を示し、正側 E_a^+ と負側 E_a^- の和である。

図-3 に載荷履歴曲線から得られる累積履歴曲線を示す。この累積履歴曲線は、載荷履歴曲線を各ループに分解し、それぞれ正負ごとに前ループの残留変形角と次ループの負荷時の初期変形角を $Q/Q_y=0$ 上で繋ぎ合わせたものである。また、最大荷重時までの全ループの総面積 E_b は無次元化累積履歴吸収エネルギー量を示し、正側 E_b^+ と負側 E_b^- の和である。

3. 既往実験結果の概要

本論で用いた既往実験の試験体数は 24 体、その内、曲げ破壊型の試験体数は 4 体、曲げ降伏型の試験体数は 8 体、せん断破壊型の試験体数は 12 体である。破壊形式は文献中の記載に従って分類しているが、「曲げ降伏後にせん断破壊」、「曲げ降伏後に付着破壊」、「曲げ降伏後にせん断破壊および付着破壊」および「曲げ降伏後に履歴破壊」と記されているものに関しては、本研究では「曲げ降伏型」として分類している。

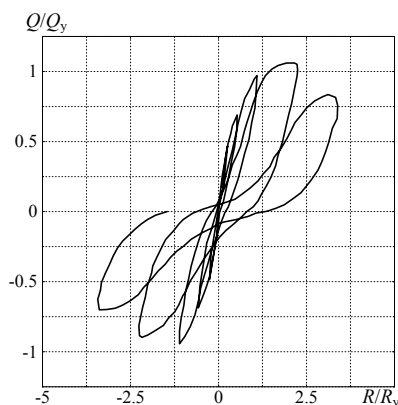


図-1 載荷履歴曲線

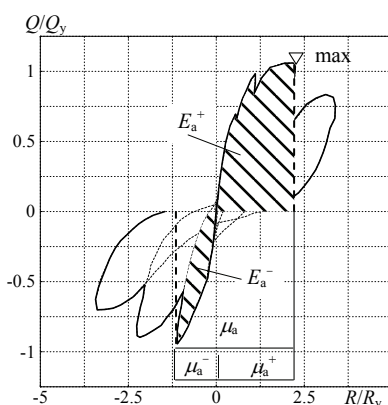


図-2 包絡線

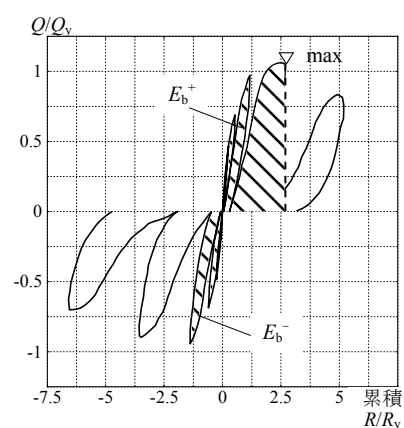


図-3 累積履歴曲線

表-1 は、既往実験の文献より載荷履歴曲線を抽出することができた試験体の諸元および実験結果の一覧である。実験変数の範囲は、コンクリート強度： $10.3\sim119.6\text{N/mm}^2$ 、主筋降伏強度： $345\sim1000\text{N/mm}^2$ 、せん断補強筋降伏強度： $323\sim846\text{N/mm}^2$ 、せん断スパン比： $1.5\sim2.5$ 、引張鉄筋比： $0.8\sim2.9\%$ 、せん断補強筋比： $0\sim1.15\%$ 、複筋比： 1.0 である。文献中に主筋およびせん断補強筋のヤング係数が記載されていない場合は、 200GPa とする。

図-4 に上記の実験変数について、曲げ破壊型、曲げ降伏型およびせん断破壊型の試験体数の分布を示す。

図より、主筋の降伏強度が $400\sim600\text{N/mm}^2$ の試験体が多く、せん断補強筋降伏強度とせん断補強筋比の低い試験体がせん断破壊している。

図-5 に塑性率 μ_a ～履歴吸収エネルギー E_a 関係を示す。

図より、 μ_a と E_a が線形関係であること、また、 μ_a の値が同じであれば、せん断破壊型試験体の E_a が曲げ破壊型および曲げ降伏型試験体の E_a よりも低くなることから、このときの μ_a と E_a の相関係数は 0.96 であった。

図-6 に塑性率 μ_a ～累積履歴吸収エネルギー E_b 関係を示す。ここで、図中の破線は近似曲線である。

この図から分かるように、 μ_a の増加とともに E_b が上昇する傾向にあり、両者の関係を多項式で近似すると次式のようになる。

$$E_b = 0.24 \times \mu_a^2 + 0.16 \times \mu_a \quad (3)$$

μ_a に対する E_b の割合が放物線的に増加することが分かり、このときの決定係数は 0.94 であった。

4. せん断余裕度と塑性率・履歴吸収エネルギーの関係

図-7 に無次元化最大荷重 Q_{emax}/Q_y ～せん断余裕度 Q_s/Q_m 関係を示す。 Q_{emax}/Q_y は実験の最大荷重 Q_{emax} を式(1)の降伏荷重 Q_y で除して得られ、 Q_s/Q_m はせん断耐力 Q_s を曲げ耐力 Q_m で除して得られる。なお、 Q_s の算定には荒川 mean 式を、 Q_m の算定には RC 規準¹⁵⁾の(解 8.20)式を用いた。

この図から分かるように、曲げ降伏型試験体の 75% とせん断破壊型試験体のほぼ全てのプロットが $Q_s/Q_m=1$ 以

表-1 既往実験の試験体の諸元および実験結果一覧

文献 番号	試験 体名	D (mm)	L (mm)	M/QD	M/Qd	Q_s (kN)	Q_m (kN)	Q_s/Q_m	Q_y (kN)	α_y	R_y (rad)	$\Sigma\mu_i$	$\sqrt{\Sigma\mu_i}$	N	β	破壊形式
6	B-300-7	450	2200	2.44	2.93	350.3	496.2	0.71	482.5	0.35	0.0126	6.72	2.6	5.5	0.59	曲げ降伏後の付着およびせん断破壊
	B-300-10	450	2200	2.44	2.93	389.8	496.2	0.79	482.5	0.35	0.0126	8.31	2.9	6	1.36	曲げ降伏後の付着破壊
	B-600-4	450	2200	2.44	2.93	380.4	496.2	0.77	482.5	0.29	0.0133	6.41	2.5	5.5	0.74	曲げ降伏後のせん断破壊
	B-600-10	450	2200	2.44	2.93	454.3	496.2	0.92	482.5	0.29	0.0133	13.96	3.7	7.5	1.80	曲げ破壊
7	No.1	400	1800	2.25	2.52	466.3	723.7	0.64	703.2	0.22	0.0133	4.67	2.2	6.5	0.51	せん断破壊
	No.2	400	1800	2.25	2.52	479.0	723.7	0.66	703.2	0.22	0.0133	5.34	2.3	7	0.63	せん断破壊
	No.3	400	1800	2.25	2.52	500.3	723.7	0.69	703.2	0.22	0.0133	7.68	2.8	8.5	0.70	せん断破壊
8	No.1	300	1200	2.00	2.48	115.3	170.8	0.68	165.7	0.33	0.0089	9.55	3.1	5.5	1.14	曲げ降伏後の付着破壊
9	N	400	1000	2.50	2.73	232.0	183.6	1.26	153.6	0.27	0.0037	68.90	8.3	10.5	2.67	曲げ破壊
10	No.2	800	1600	2.00	2.24	1606.4	1121.8	1.43	1090.6	0.20	0.0127	14.56	3.8	7.5	1.64	曲げ破壊
	No.3	800	1600	2.00	2.38	1768.5	2108.9	0.84	2051.6	0.27	0.0181	10.24	3.2	7.5	1.42	曲げ降伏後の付着およびせん断破壊
11	A	200	500	2.50	2.94	58.4	73.4	0.80	71.4	0.27	0.0046	7.74	2.8	2.5	0.68	せん断破壊
	B	200	500	2.50	2.94	76.5	41.1	1.86	39.8	0.20	0.0053	146.96	12.1	13.5	3.25	曲げ降伏後履歴破壊
12	no1	400	2000	2.50	2.93	335.9	280.3	1.20	272.0	0.25	0.0085	51.70	7.2	11.5	1.99	曲げ破壊
13	N134-00	280	840	1.50	1.78	59.3	161.5	0.37	156.7	0.18	0.0057	6.16	2.5	3.5	0.58	せん断破壊
	N134-15	280	840	1.50	1.78	87.3	161.5	0.54	156.7	0.18	0.0057	6.16	2.5	3.5	0.56	せん断破壊
	N134-30	280	840	1.50	1.78	98.9	161.5	0.61	156.7	0.18	0.0057	14.10	3.8	5.5	0.83	せん断破壊
	L134-00	280	840	1.50	1.78	44.8	161.5	0.28	156.7	0.24	0.0054	1.86	1.4	1.5	0.26	せん断破壊
	L134-15	280	840	1.50	1.78	72.8	161.5	0.45	156.7	0.24	0.0054	6.50	2.6	3.5	0.57	せん断破壊
	L134-30	280	840	1.50	1.78	84.4	161.5	0.52	156.7	0.24	0.0054	14.90	3.9	5.5	0.93	せん断破壊
	L076-00	280	840	1.50	1.68	43.9	73.1	0.60	70.9	0.19	0.0028	12.57	3.5	3.5	1.07	せん断破壊
	L076-15	280	840	1.50	1.68	73.6	73.1	1.01	70.9	0.19	0.0028	16.16	4.0	4	0.75	せん断破壊
	L076-30	280	840	1.50	1.68	85.9	73.1	1.18	70.9	0.19	0.0028	16.16	4.0	4	2.13	曲げ降伏後の付着破壊
14	No2-5	400	1200	1.50	1.80	314.9	448.4	0.70	423.2	0.19	0.0087	9.22	3.0	4.5	1.02	曲げ降伏後の付着およびせん断破壊

[注] D : 梁せい, d : 有効梁せい, L : クリアスパン, Q_s : せん断耐力, Q_m : 曲げ耐力, Q_y : 降伏荷重, α_y : 剛性低下率, R_y : 降伏変形角, μ_i : 変位振幅, N : 最大耐力に達するまでの繰り返し回数, β : エネルギー比

下であった。また、無次元化最大荷重 $Q_{\text{emax}}/Q_y=1.2$ 付近に曲げ破壊型試験体, $Q_{\text{emax}}/Q_y=1.0$ 前後に曲げ降伏型試験体のプロットが集中しており, せん断破壊型試験体のプロットは $Q_{\text{emax}}/Q_y=1.0$ 以下であった。破壊形式と Q_s/Q_m との相関はないものの, Q_{emax}/Q_y とには一定の相関が見られた。全体的には, Q_{emax}/Q_y と Q_s/Q_m との相関は見られなかった。

図-8 にせん断余裕度 Q_s/Q_m ~ 塑性率 μ_a 関係を示す。なお, $Q_s/Q_m=1$ 以上にある曲げ破壊型および曲げ降伏型試験体の μ_a の値は 4.83~12.9 であった。ここで, 本論で定

義した μ_a が正側 μ_a^+ と負側 μ_a^- の値の和であることから, μ_a の値は文献¹⁸⁾で定義されている塑性率の値の約半分である。つまり, μ_a を文献¹⁸⁾の塑性率に換算すると, 換算値は 2~6 程度となり, 文献¹⁸⁾中に記載されている値 (2~8 程度) の範囲内であることが分かった。

以上より, Q_s/Q_m が高くなると μ_a も上昇する傾向にあり, Q_s/Q_m と μ_a の相関係数は 0.76 であった。

図-9 にせん断余裕度 Q_s/Q_m ~ 履歴吸収エネルギー E_a 関係を示す。この図から分かるように, Q_s/Q_m が上昇すると E_a が増加する傾向にあり, Q_s/Q_m と E_a の相関係数は

0.81 であった。

図-10 にせん断余裕度 Q_y/Q_m ～累積履歴吸収エネルギー E_b 関係を示す。この図より、 Q_y/Q_m が上昇するに従って E_b が増加する傾向にあることが分かり、両者の相関係数は 0.83 であった。

5. エネルギー比と载荷履歴特性・せん断余裕度の関係

図-11 にエネルギー比 β ～繰り返し回数 N 関係を示す。ここで、 β は塑性率 μ_a に対する累積履歴吸収エネルギー E_b の割合であり、 μ_a と履歴吸収エネルギー E_a が線形関係

であることが図-5 で示されていることから、本研究では μ_a に対する E_b の割合をエネルギー比と呼んでいる。本章ではこの β を用いて载荷履歴特性の影響を検討する。また、横軸の N は最大耐力に達するまでの繰り返し回数であり、正側と負側の両方の履歴を経験したときを 1 回とし、正側のみの場合は 0.5 回とする。

β と N の関係を調べるためには、同じ载荷履歴を経験した試験体での比較を行う必要がある。そこで、文献⁶⁾ の曲げ降伏した 4 体の試験体について検討する。図中の引出線は 4 体の試験体の実験結果を示している。また、

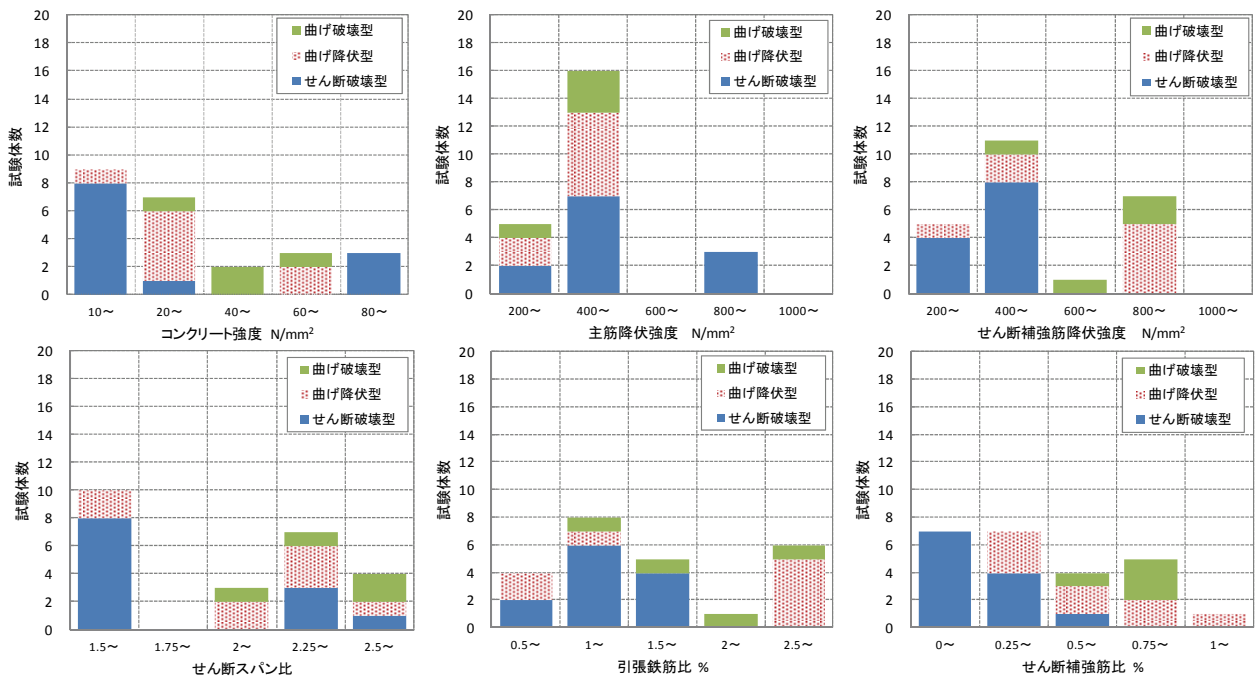


図-4 各実験変数における試験体数の分布状況

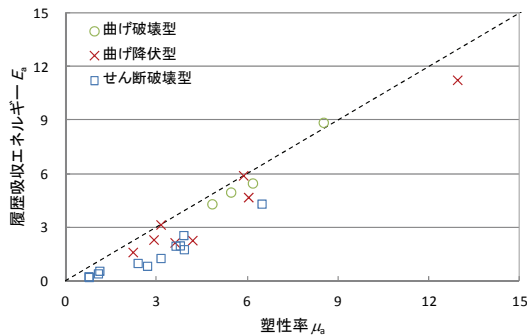


図-5 塑性率～履歴吸収エネルギー関係

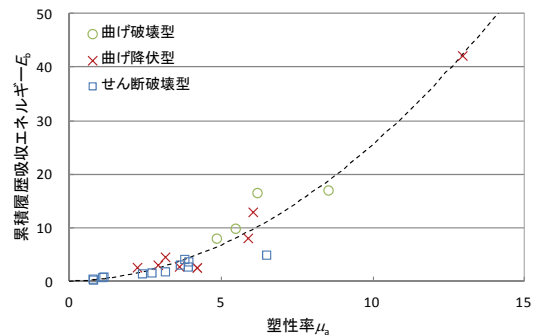


図-6 塑性率～累積履歴吸収エネルギー関係

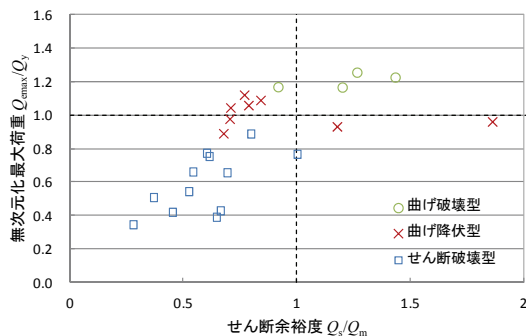


図-7 無次元化最大荷重～せん断余裕度関係

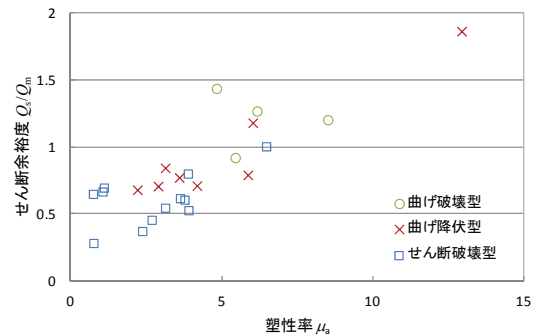


図-8 せん断余裕度～塑性率関係

試験体の違いはコンクリート強度とせん断補強筋比のみであり、それ以外の条件は同じである。なお、文献⁹⁾の試験体名はコンクリート強度とせん断補強筋比を表わしており、例えば B-300-7 試験体は、コンクリート強度が 30N/mm² でせん断補強筋比が 0.66% である。

図中の文献⁹⁾の実験結果を比較すると、コンクリート強度とせん断補強筋比が高い試験体の方が N と β の値が高くなる事が分かる。全体的には、曲げ破壊型および曲げ降伏型の試験体では N の増加とともに β も上昇しているが、せん断破壊型の試験体においては両者の相関はなかった。

図-12 にエネルギー比 β ～ 載荷変位振幅 $\sum \mu_i$ 関係を示す。横軸の μ_i は i サイクル目の変位振幅であり、 $\sum \mu_i$ は最大耐力に達するまでの変位振幅の総和である。

この図より、曲げ破壊型および曲げ降伏型試験体では $\sum \mu_i$ が増加するに従って β も上昇しているが、 $\beta=2$ 程度になるとその上昇率は緩やかになる。また、せん断破壊

型試験体においては、両者の相関はなかった。

図-13 にエネルギー比 β ～ せん断余裕度 Q_s/Q_m 関係を示す。図より、曲げ降伏型試験体では Q_s/Q_m の上昇とともに β が大きくなっているが、曲げ破壊型およびせん断破壊型試験体において両者の相関は見られなかった。

図-14 にエネルギー比 β ～ 載荷変位振幅 $\sum \mu_i$ 、繰り返し回数 N およびせん断余裕度 Q_s/Q_m 関係を示す。横軸は、 N 、 $\sum \mu_i$ および Q_s/Q_m を考慮した β の評価式で、次式の右辺の項である。

$$\beta = (Q_s/Q_m) \times \log(N \times \sum \mu_i) \quad (4)$$

なお、図 11～図 13 の既往実験結果より、曲げ破壊型および曲げ降伏型部材において、 β と N 、 $\sum \mu_i$ あるいは Q_s/Q_m との間に相関が示されている。そこで、本研究ではそれらの指標を用いて、エネルギー比を線形的に表現しうる評価式を試行錯誤により求め、(4)式を提案している。よって、(4)式には特別な物理的意味づけを行っていない。

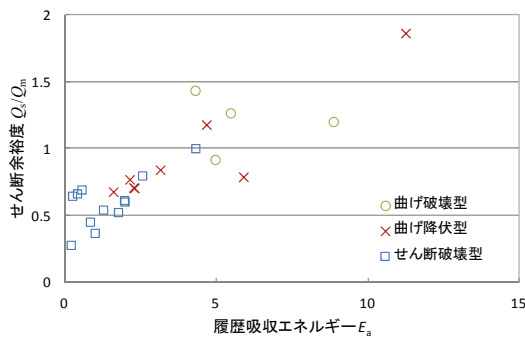


図-9 せん断余裕度～履歴吸収エネルギー関係

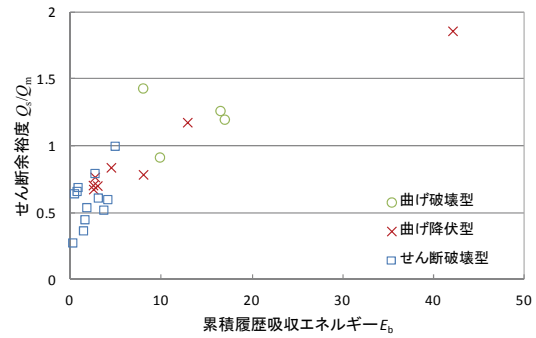


図-10 せん断余裕度～累積履歴吸収エネルギー関係

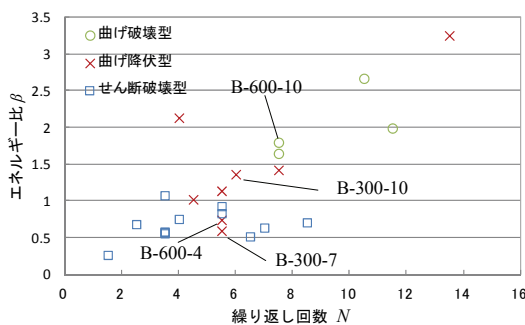


図-11 エネルギー比～繰り返し回数関係

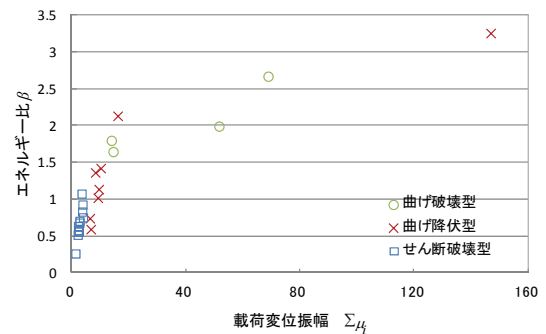


図-12 エネルギー比～載荷変位振幅関係

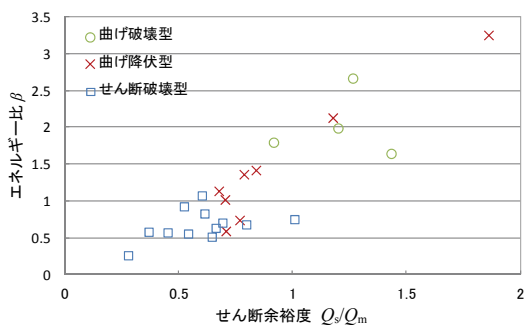


図-13 エネルギー比～せん断余裕度関係

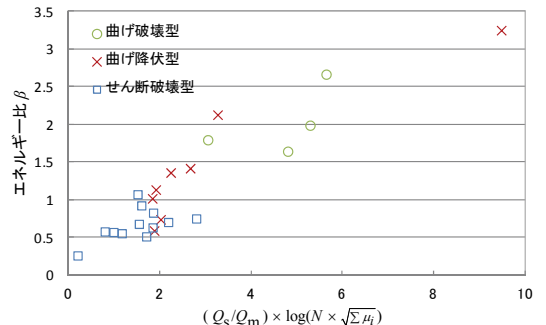


図-14 エネルギー比～載荷変位振幅、繰り返し回数およびせん断余裕度関係

図より、曲げ破壊型および曲げ降伏型試験体においては、本論で提案した評価式を用いることで β を概ね評価できることが分かる。

6. まとめ

繰返し荷重を受ける RC 梁部材の既往実験結果を基に、塑性変形性能とエネルギー吸収能力について、特に最大耐力時の両者の関係に着目して検討した。さらに、荷重履歴特性およびせん断余裕度との関係についても検討した。限られた範囲ではあるが、本検討により得られた結論を以下に示す。

- 1) 既往実験結果から得られた包絡線における塑性率と累積履歴曲線における累積履歴吸収エネルギーとは放物線的な関係になる。
- 2) 本研究で使用した既往実験結果において、本論で定義した塑性率と履歴吸収エネルギーはせん断余裕度で概ね評価することができる。
- 3) 曲げ破壊型部材の塑性率に対する累積履歴吸収エネルギーの割合は荷重履歴特性とせん断余裕度に依存する。

今後、さらに実験データを蓄積し、繰返し回数や変位振幅等の荷重履歴特性を考慮した塑性変形性能とエネルギー吸収能力の評価手法について検討する必要がある。また、今回の結果では、せん断破壊する RC 梁部材の塑性変形性能とエネルギー吸収能力との相関が見られなかったため、せん断破壊型に関しては、別途検討を行う必要がある。

謝辞

本研究においては、文献⁶⁾⁻¹⁴⁾の貴重な実験結果を使用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990
- 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, 1999
- 3) 渡辺英義，是永健好，中野克彦，松崎育弘：曲げ降伏後にせん断破壊する RC 梁部材の靱性評価に関する実験研究，日本建築学会構造系論文集，No.560，pp.161-168，2002.10
- 4) 向井智久，畑洋和，野村設郎：曲げ降伏する RC 造梁部材の地震時損傷評価と安全限界エネルギー吸収量算定式の提案，日本建築学会構造系論文集，No.617，pp.145-151，2007.7
- 5) 高橋俊之，向井智久，濱田真，斉藤大樹，福山洋，薬研地彰，衣笠秀行：多数回繰返し変形を受ける RC 造梁部材のエネルギー吸収低下に関する研究，構造工学論文集，No.56B，pp.33-41，2010.3
- 6) 中村雅彦，別所佐登志，加藤友康，張愛暉：高強度材料を用いた高層 RC 梁の曲げせん断実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.2，pp.529-534，1992
- 7) 松野一成，角徹三：正負繰返し荷重を受ける高強度 RC はりのせん断抵抗性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.2，pp.497-502，1994
- 8) 八十島章：DFRCC パネルで補強した RC 梁の耐震性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.32，No.2，pp.1375-1380，2010
- 9) 藤川昌作，香取慶一，林静雄：鉄筋コンクリート有孔梁の変形性能に関する実験研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.467-468，1993.9
- 10) 張愛暉，別所佐登志，加藤友康：高強度材料を用いた高層 RC 実大はりの曲げ実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.719-720，1992.8
- 11) 窪田陽一，衣笠秀行，野村設郎，田中敬人：RC 梁部材の曲げ降伏後の繰返し荷重下に特有な破壊の発生メカニズム，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.477-478，1998.9
- 12) 細矢博，岡靖弘，岸本剛，浅野芳伸：開孔を有する高強度 RC 梁の構造特性に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.355-356，2001.9
- 13) 松井剛，八十島章，荒木秀夫：低強度コンクリートを用いた RC 梁の耐震性能，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.9-12，2008.9
- 14) 益尾潔，市岡有香子，田川浩之，足立将人：SD490 および 785N/mm² 級横補強筋を用いた RC 梁の構造性能（その 1 実験概要），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1839-184，2010.9
- 15) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010
- 16) 中範昊，壁谷澤寿海：高強度 RC 柱部材の耐力および変形性能の評価法に関する研究，構造工学論文集，No.40B，pp.315-322，1994.3
- 17) 前田匡樹，有菌祐介，幸村信行：鉄筋コンクリート梁部材の変形評価法に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.861-866，1997.7
- 18) 姜柱，北山和宏：鉄筋コンクリート梁の降伏変形推定方法，日本建築学会構造系論文集，No.501，pp.85-92，1997.11
- 19) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能，1990