

論文

[2044] 交番繰り返し荷重を受ける RC 部材の履歴復元力特性及び
靱性評価

正会員○中村泰介（東北大学大学院）

正会員 鈴木基行（東北大学工学部）

正会員 尾坂芳夫（東北大学工学部）

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐震性を解析的に検討するためには、交番繰り返し荷重を受ける RC 部材の履歴復元力特性および終局変位を定量的に評価しておかなければならない。RC 部材の解析用履歴復元力モデルは、武藤¹⁾、武田²⁾等により提案されている。しかし、 $3\delta y$ (δy :部材降伏変位)以降、実験により得られた荷重-変位関係とこれらのモデルとの適合性が悪い、との報告³⁾もあり、これらのモデルは、必ずしも終局に至るまで部材の挙動を的確に反映したものとは言えない。一般に、交番繰り返し荷重を受ける部材の包絡線は、最大荷重以降低下する。また、同一変位で交番繰り返し载荷が行われると、各サイクルでの最大荷重は徐々に低下する現象が認められる。しかし、これら部材挙動が部材履歴復元力モデルに考慮されていないため、実験結果との適合性が悪くなるものと考えられる。また、終局変位の定量化をはかった研究として、檜貝ら⁴⁾、町田ら⁵⁾、石橋ら⁶⁾によるもの等があるが、部材の降伏および終局の定義に統一性がみられないなどの問題点があり、十分な精度を持った評価式は未だ提案されていない。以上のような観点から、本研究では、橋脚やラーメン高架構造物等に多く用いられるせん断スパン比 (a/d) 4 程度の RC 部材を対象に、同一変位で繰り返し荷重を受ける部材の各サイクルでの最大荷重が徐々に低下する現象を考慮に入れた履歴復元力特性のモデル化、および終局変位の定量化をはかることを目的とした。

2. 交番繰り返し荷重を受ける RC 部材の終局の定義と終局変位の定量化

2. 1 対象とした供試体の諸元

表-1 に対象とした供試体の諸元を示す。今回対象とした供試体は、せん断スパン比が 4 程度の RC 柱で、ある変位での正負交番繰り返しにより部材耐力が著しく低下したもののだけである。供試体の変動因子は、軸方向主鉄筋比 (ρ_x)、帯鉄筋比 (ρ_s)、軸圧縮応力度 (σ_0) である。T シリーズは、同一変位での繰り返し回数が 5 回、Y シリーズは 3 回である。断面寸法 (幅×全高) は、T シリーズが 40cm×40cm、Y1~Y3 が 13cm×30cm、Y4~Y7、Y9~Y11 が 15cm×30cm、および Y8 が 50cm×33cm である。また、供試体载荷時のコンクリートの圧縮強度は 202~552 (kgf/cm²) である。

2. 2 終局状態の定義

RC 部材の変形性能を評価する上で、終局状態をいかに定義するかは重要な問題である。既往の

表-1 供試体諸元

柱 No.	a/d	降伏変位 (mm)	軸方向鉄筋比 (%)	帯鉄筋比 (%)	軸力 (kg/cm ²)	$\delta u/\delta y$
T1	4.00	6.9	0.950	0.357	15	7
T2	4.00	13.0	3.800	0.357	15	5
T3	4.00	11.0	2.149	0.238	15	5
T4	4.00	11.0	2.149	0.158	15	4
T5	4.00	10.5	2.149	0.285	15	5
T6	4.00	10.4	2.149	0.178	10	5
T7	4.00	10.5	2.149	0.357	40	4
T8	4.00	10.0	2.149	0.357	0	6
T9	4.00	9.0	1.490	0.357	15	5
T10	4.00	9.1	1.490	0.238	15	6
T11	4.00	9.0	1.490	0.158	15	5
Y1	4.00	3.5	1.297	0.000	0	5
Y2	4.00	4.3	1.297	0.104	0	7
Y3	4.00	3.9	1.297	0.193	0	8
Y4	4.00	4.8	1.764	0.000	0	4
Y5	4.00	4.9	1.764	0.107	0	6
Y6	4.00	5.1	1.764	0.209	0	6
Y7	4.00	4.9	1.764	0.314	0	7
Y8	4.11	4.2	1.091	0.000	0	7
Y9	3.85	3.5	1.124	0.000	0	6
Y10	3.85	5.1	1.124	0.160	0	7
Y11	3.85	3.7	1.124	0.330	0	10

研究では、終局の定義として「荷重-変位包絡線の下降域において、荷重が最大荷重の80%に低下するとき」あるいは、「荷重-変位包絡線の下降域において、荷重が降伏荷重と等しくなったとき」などが提案されている。しかし、いずれの定義も便宜的なものであり、力学的裏付けを有するものではない。本来、終局状態は、耐力上の均衡のくずれ、繰返し加力時の剛性低下、あるいはエネルギー吸収能の低下などの現象が生じた状態と考えられる。図-1は、正負交番繰返し荷重を受けたRC部材の各サイクル毎の包絡線を描いたものの一例である。この図に見られるように、交番した曲げ及びせん断の作用を受けるRC部材の荷重-変位関係には次のような特徴が認められる。

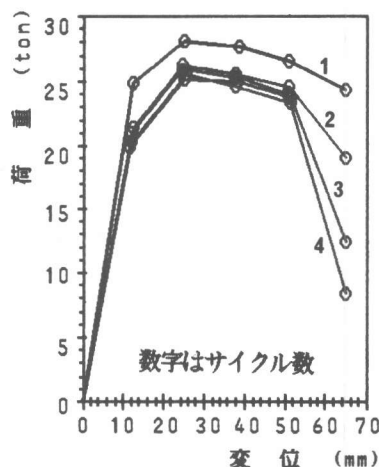


図-1 各サイクルの包絡線

- 1) 同一変位で交番繰返し荷重を行うと繰返し回数の増加と共に最大荷重は低下する。
- 2) 1サイクル目から2サイクル目への荷重の低下割合は、それ以降における低下割合と比べ、かなり大きい。
- 3) 同一変位で数回の繰返し荷重が行われても、荷重があるレベルよりも下がらない安定した荷重変位領域と、繰返し数の増加と共に最大荷重が低下し、部材耐力を失う不安定な領域とがある。

本研究では、この安定変位領域と不安定変位領域の境界を終局状態と定義して、そのときの変位および荷重をそれぞれ終局変位 δu および終局荷重 P_u とする。

2.3 変位靱性率の定量的評価

前述の定義に基づき、変位靱性率 ($\mu = \delta u / \delta y$) を軸方向主鉄筋比 ρ_g 、帯鉄筋比 ρ_w 、および軸圧縮応力比 σ_c / f_c' を変数として求めた結果を以下に示す。

$$\mu = 6.2 - 3.1 \cdot \log \rho_g + 4.6 \cdot (\rho_w)^{0.5} - 23.8 \cdot \sigma_c / f_c' \quad (1)$$

この回帰式の相関係数は87.3%となった。図-2に実験値との比較を示す。実験値と比較的よく対応している。(1)式により、 ρ_g が大きくなると靱性率は小さくなり、逆に ρ_w を大きくすると靱性率は大きくなることわかる。また、 σ_c / f_c' を大きくすると靱性率は小さくなる。なお、変数の適用範囲は、 $0.95 \leq \rho_g \leq 3.80(\%)$ 、 $0.0 \leq \rho_w \leq 0.357(\%)$ 、 $0.0 \leq \sigma_c / f_c' \leq 0.11$ である。部材の靱性率は、本来ばらつきを有しており、RC部材を靱性に基づいて設計する場合、このばらつきを合理的に考慮しなければならない。図中に示した --- 線は、ばらつきを正規分布と仮定し、変動係数を靱性率によらず一定(全データの靱性率の μ_{exp} / μ_{cal} の比の変動係数は、12.1%であった。)と仮定したときの95%信頼度値を

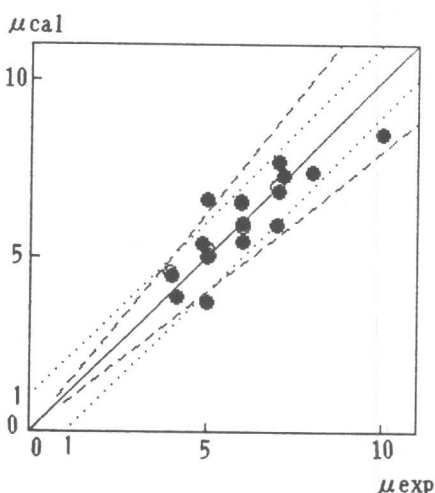


図-2 実験値と計算値の比較

示しており、設計においてこの下5%線を使用することも一案であると考えられる。

2. 4 靱性に及ぼす繰返し回数の影響

今回用いた供試体のうち、Tシリーズは同一変位で5回の繰返しを行い、Yシリーズは3回の繰返しを行ったものである。そこで、それぞれのシリーズ別に靱性率の回帰式を求めた結果、以下の式が得られた。

$$T \text{ シリーズ: } \mu t = 4.9 - 1.8 \cdot \log R_2 + 4.1 \cdot (R_2)^{0.5} - 11.5 \cdot \sigma_0 \text{ fc}' \quad (2)$$

相関係数 78.4%

$$Y \text{ シリーズ: } \mu y = 6.7 - 4.9 \cdot \log R_2 + 5.4 \cdot (R_2)^{0.5} \quad (3)$$

相関係数 93.0%

Yシリーズの供試体はいずれも作用軸力がないため、上式では、軸方向主鉄筋比と帯鉄筋比とが変動要因である。ここで、(2)式にYシリーズのデータを用いて靱性率を求めてみると、実験値に比べてやや小さめの値を与えた(図-3)。式(2)は、繰返し回数が5回の供試体による回帰式のため、式(3)に比べて小さめの靱性値を与える。これは、同一変位での繰返し回数が多いほど部材の損傷が大きくなるためと思われる。しかし、データの欠如のため、ここでは靱性に及ぼす繰返し回数の影響について定量的な評価はできなかったが、上に述べたように、今後は靱性評価式に繰返し回数の影響を考慮に入れる必要があると思われる。

2. 5 靱性に及ぼす荷重パターンの影響

以前、著者ら⁷⁾が行った交番繰返し荷重実験の供試体諸元を表-2に、また荷重パターンを表-3に示す。図-4に荷重-変位関係の1サイクル目の包絡線を示す。B1、およびB4は、ほぼ同じパターンで荷重したものであるが、一方向単調漸増荷重を行ったB8の荷重-変位曲線と比べて、比較的早い段階で荷重が低下している。これに対して、B2の包絡線はB8とほぼ同じ軌跡をたどっており、4δyから荷重の低下が始まる。B3においても5δyまでB8とほぼ同じ軌跡をたどり、その後急激に荷重が低下している。

表-2 供試体諸元

a / d	軸方向鉄筋比 (%)	帯鉄筋比 (%)	軸力 (kg/cm ²)
4.0	2.149	0.446	0.0

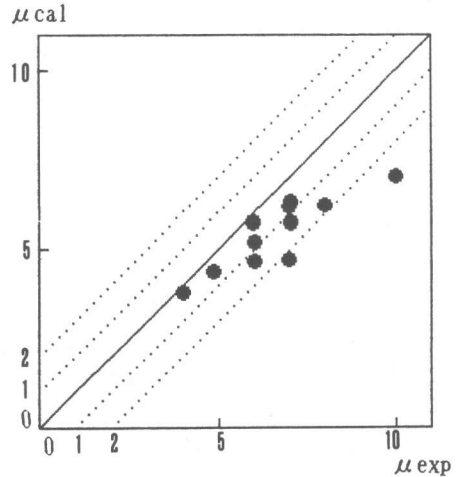


図-3 μtのYシリーズのデータによる検証

表-3 荷重パターン

No	荷重パターン (カッコ内は繰返し回数)
B1	1δy → 2δy → 3δy → 4δy → 5δy → 6δy → (5)
B2	1δy → 3δy → 5δy → 7δy → 8δy → (5)
B3	1δy → 5δy → 6δy → 7δy → 8δy → (5)
B4	1δy → 2δy → 1δy → 3δy → 2δy → 4δy → 3δy → (3) (2) (3) (2)
B8	静的-一方向荷重

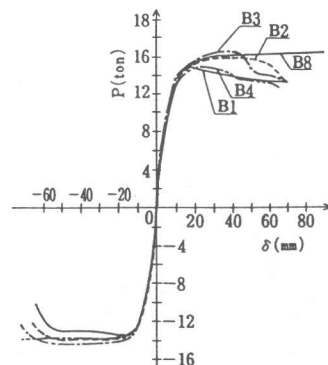


図-4 包絡線 (荷重パターンの違い)

このような事実から判断して、一方向単調漸増載荷時の荷重-変位曲線は、正負交番繰り返しを受けた場合の包絡線の上限值であり、ある変位レベルに到達するまでの変位履歴および繰り返し回数が少ないほど、その包絡線はより大きな変位レベルまで一方向単調漸増載荷時の荷重-変位曲線と一致するといえる。また、急激に大きな変位まで載荷すると、その変位が大きいほど最大耐力以降の包絡線の低下も急激になる。このことから、載荷パターンも靱性に大きく影響することを示している。前節で示した靱性評価式(1)は、各 $n \delta y (n=1, 2, \dots)$ で3~5回の繰り返しを行った供試体のデータから求めた回帰式であることから、より安全側の評価を与えているといえる。

2. 6 終局の定義に対する考察

本研究では、終局変位を「同一変位で繰り返し繰り返し載荷を行った時、繰り返しサイクルの増加と共に最大荷重が大きく低下していく変位」と定義した。2. 2で述べたように、既往の研究では、終局変位は「包絡線の最大荷重の80%に低下する時の変位、あるいは降伏荷重と等しくなった時の変位」などと定義されている。しかし、既往の実験データ^{4) 7) 8)}には、最大荷重の80%あるいは降伏荷重に対応する変位以前に繰り返しにより荷重が大きく低下する場合も多くみられる。これらの供試体は、いずれも曲げせん断型の挙動を示しており、最大荷重の80%や降伏荷重などで終局を定義した時の靱性値は、本研究の定義によるものよりもやや大きめの値を与える。したがって、靱性を議論する上で、包絡線を基にした終局の評価方法では、終局変位に達する前に繰り返しにより耐力を失うことがあるので、必ずしも適切に評価しているとは思われない。さらに、部材剛性を考えた場合、包絡線のみにより規定した終局時の剛性は、それ以前の変位での繰り返しにより低下した剛性よりも大きい値を与えるので、繰り返しによる部材特性の低下を考慮せずに終局を判断するのは適当とは思われない。

3. 交番繰り返し荷重を受けるRC部材の履歴復元力特性のモデル化

これまで述べたように、部材が繰り返し繰り返し荷重を受けると、最大耐力以降荷重は低下し、また同一変位で繰り返し繰り返しを行うたびに荷重は低下していく。したがって、解析用モデルにはこれら重要な部材特性を考慮すべきであると思われる。以下にそのモデル化の方法を示す。

3. 1 最大荷重 P_{max} および終局荷重 P_u の評価

部材の履歴復元力モデルを定量化するためには、最大荷重 P_{max} および終局荷重 P_u を明確にしておく必要がある。

(1) 最大荷重 P_{max}

実験結果より、全データの最大荷重 P_{max} の降伏荷重 P_y に対する比 (P_{max} / P_y) は、平均値が1.16、および変動係数は6.11%となった。しかし、シリーズ別に集計してみると平均値は、Yシリーズでは1.11、Tシリーズでは1.21であった。これは、Yシリーズの作用軸力が零であるため、降伏以降の荷重の上昇が1割程度にとどまったものと推測される。したがって、モデル化に当たっては次のように最大荷重 P_{max} を定めた。

$$P_{max} = \alpha \cdot P_y \quad \text{但し、} \quad \sigma_0 = 0.0 \text{ の場合} \quad \alpha = 1.1 \\ \sigma_0 \neq 0.0 \text{ の場合} \quad \alpha = 1.2$$

また、最大荷重時は変位 $2\delta y$ で発生するものとした。

(2) 終局荷重 P_u

前述の定義による終局時の荷重 P_u の最大荷重 P_{max} に対する比 (P_u / P_{max}) を求めると平均値は0.90、変動係数は10.8%であった。実験値と P_u を $0.9 \cdot P_{max}$ として計算した値を図-6に示す。これにより、終局荷重を $0.8 \cdot P_{max}$ や P_y で定義すると、そのときの靱性値は、やや危険側の評価

を与えることになると思われる。

3. 2 同一変位での交番繰り返しによる荷重低下

既に述べたように、同一変位での交番繰り返しにおいて、1サイクル目から2サイクル目への荷重の低下は、それ以降の低下と比べかなり大きく、2サイクル目以降の荷重の低下は比較的少ない。そこで、本研究では、2サイクル目以降の最大荷重はあるレベルに収束すると仮定した。一方向単調漸増載荷により得られた荷重-変位曲線を基準に、交番繰り返し時のある変位レベルにおける1サイクル目の最大荷重を P_1 、2サイクル目の最大荷重を P_2 とし、また、基準値 P_0 から1サイクル目の荷重低下割合を $R_1 (=1-P_1/P_0)$ 、1サイクル目から2サイクル目の荷重低下割合を $R_2 (=1-P_2/P_1)$ とした。なお、対象とした供試体は明確に荷重低下が確認されたT7~T11である。ここで、 R_2 を軸方向主鉄筋比(ρ_2)、帯鉄筋比(ρ_0)、および軸圧縮応力比(σ_0/fc')を変動因子として次式を得た。なお、この式の適用範囲は、 $1.490 \leq \rho_2 \leq 2.149$ (%), $0.158 \leq \rho_0 \leq 0.357$ (%), $0.00 \leq \sigma_0/fc' \leq 0.11$ である。

$$R_2 = a + b \cdot n \quad (4)$$

$$a = 19.24 - 0.68 \cdot \rho_2 - 62.56 \cdot \sigma_0 / fc'$$

$$b = -2.84 - 1.09 \cdot \rho_2 + 8.08 \cdot \rho_0$$

$$n = \delta / \delta y$$

また、2.3で求めた繰り返しを受ける部材の靱性率 μ を用いて R_1 に関し次式を得た。

$$R_1 = 0.1 \cdot (n-2) (\mu-2) \quad (5)$$

3. 3 履歴復元力特性のモデル化

本研究では、繰り返しによる荷重の低下を考慮に入れた履歴復元力特性のモデル化を行った。

一方向単調漸増載荷時の荷重-変位曲線は、繰り返しを行ったときの包絡線の上限值と考えられるので、これを基本曲線とし、図-7に示すように4本の直線で表した。また、図-8に提案した履歴復元力特性のモデルの概略を示す。以下に履歴法則を示す。なお、ひび割れ発生以前および降伏以前の除荷は原点指向型とした。

(1) 降伏以降の載荷は、基本直線上を進むものとする。基本曲線からの除荷は、以前著者らが提案した除荷剛性 K_m にしたがって進むものとする(Seg 4)。また、荷重0点との交点を X_0 とする。

$$K_m = \left| \frac{P_y}{\delta y} \right| \cdot \left| \frac{1}{n} \right|^{0.4} \quad (6)$$

(2) X_0 点からの載荷は、過去の最大変位の基本曲線上の荷重より3.2で求めた (R_1+R_2) 低下した点を目指して進む(Seg 9)。反対側の最大点が降伏以前の降伏点を目指すものとする(Seg 5)。基本直線に達した以降は基本直線上を進む。

(3) Seg 11からの除荷は、除荷点が過去の最大

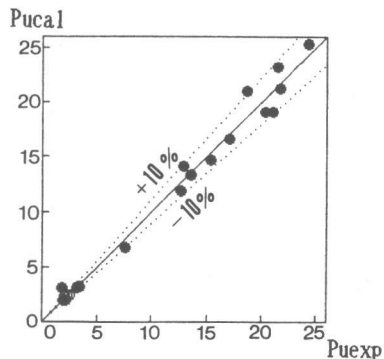


図-5 P_u の実験値と計算値

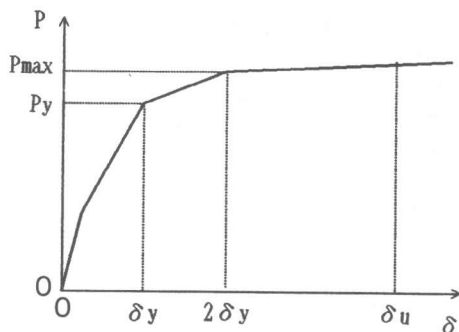


図-6 包絡線の概形

変位点を越えない場合は1サイクル前の剛性と等しいものとし、最大点を越えた場合は K_m に従って戻る。また、荷重0点との交点を X_1 点とすると、 X_1 点からの荷重は、最大点より R_2 だけ荷重低下した点を目指すものとする (Seg 13)。

(4) 最大点の変位を下回って荷重が反転する場合の除荷剛性は1 サイクル前の剛性と等しいものとする (Seg 12)。

(5) 2. 3で求めた靱性率を越えて変形が進む場合、 X_1 点からの荷重は、そのたび毎にの最大点の荷重の10%低下した点を目指すものとする。

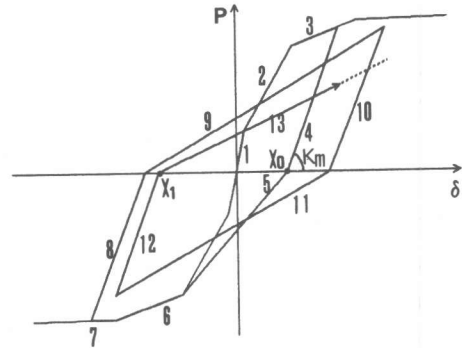


図-7 履歴復元力特性のモデル化

4. 結論

(1) 同一変位で交番繰返しを行うと最大荷重があるレベルよりも下がらない安定した領域と繰返し数の増加と共に最大荷重が低下し部材耐力を失う不安定な領域とがある。本研究では、この二つの領域の境界を終局状態と定義した。

(2) 交番繰返しを受けるRC部材22本を対象に、軸方向主鉄筋比 ρ_s 、帯鉄筋比 ρ_w 、および軸圧縮応力比 σ_o / f_c' を変動因子として変位靱性率 ($\mu = \delta u / \delta y$) の評価式を提案した。

(3) 靱性率にばらつきを考慮した特性値の概念を提案した。

(4) 安定領域において、同一変位で繰返しを行う場合、繰返し回数が増加しても最大荷重はあるレベルよりも低下しないが、靱性に対し影響を及ぼす。

(5) RC部材の交番繰返し実験の結果より、荷重パターンは荷重-変位関係の包絡線に大きな影響を与える。ある変位に到達するまでの変位履歴が少ないほど、その描く包絡線は一方単調漸増荷重時の荷重-変位関係に近くなる。

(6) 交番繰返し荷重を受けるRC部材の履歴復元力特性を、繰返しを受けることにより荷重が低下する現象を取り入れて、一方単調漸増荷重の荷重-変位曲線を基本としてモデル化を行った。このとき、荷重低下の割合を軸方向主鉄筋比 ρ_s 、帯鉄筋比 ρ_w 、および軸圧縮応力比 σ_o / f_c' を用いて定式化した。

謝辞:本研究の一部は、昭和62, 63年度文部省科学研究費補助金総合研究(A) (No. 62302042) によつたことを付記する。

参考文献 1) 武藤 清: 構造物の動的設計、丸善、昭和52年1月 2) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N.N: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, ASCE, Vol. 96, No. ST 12, Dec., 1970 3) 太田: 繰返し荷重下における鉄筋コンクリート橋脚の挙動に関する研究、土木学会論文報告集、第292号、1979、pp. 65~74 4) 檜貝、二羽、岡村: 曲げ降伏後にせん断破壊するRC部材の破壊メカニズムに関する考察、コンクリート工学年次論文報告集、第9巻第2号、1987、pp. 329~334 5) 町田、睦好、豊田: 鉄筋コンクリート部材の塑性変形能定量化に関する研究、土木学会論文集、第378号/V-6、1987、pp. 203~212 6) 石橋、吉野: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形能力に関する研究、土木学会論文集、第390号/V-8、1988、pp. 57~66 7) 尾坂、鈴木、蟹江: RC柱の履歴復元力特性に及ぼす荷重速度と荷重パターンの影響、構造工学論文集、Vol. 34A、1988、pp. 911~922 8) 尾坂、鈴木、桑澤、石橋: 静的交番繰返し荷重下でのRC柱の履歴復元力特性に関する研究、土木学会論文集、第372号/V-5、1986、pp. 45~54