

# 鉄筋コンクリート橋脚の載荷履歴特性のモデル化

武村浩志<sup>1</sup>・川島一彦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 (株) ピー・エス (〒170 東京都豊島区南大塚 3-20-6)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 東京工業大学土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

地震時保有水平耐力法に基づくRC橋脚の耐震設計では、非線形履歴特性をどのように設定するかが重要である。曲げ破壊先行型橋脚の履歴特性を定めるためには、降伏変位、降伏荷重、終局変位、終局変位以後の耐力の低下率、除荷曲線の勾配、除荷曲線につながる載荷曲線の勾配を正しく与える必要がある。本報告は、RC橋脚模型の正負交番載荷実験結果に基づいて、曲げ破壊先行型の鉄筋コンクリート橋脚に対する終局変位以後の耐力の低下率、除荷曲線の勾配の推定方法を検討した結果を報告するものである。

**Key Words** ; seismic design, reinforced concrete bridge, nonlinear hysteretic model

## 1. はじめに

地震時保有水平耐力法に基づくRC橋脚の耐震設計では、非線形履歴特性をどのように設定するかが重要である。曲げ破壊先行型橋脚の履歴特性を定めるためには、降伏変位、降伏荷重、終局変位、終局変位以後の耐力の低下率、除荷曲線の勾配、除荷曲線につながる載荷曲線の勾配を正しく与える必要がある。降伏変位、降伏荷重、終局変位に関しては平成8年道路橋示方書の方法で求めた値が実験結果とよく一致することが報告されている<sup>1)</sup>。本報告は、RC橋脚模型の正負交番載荷実験結果に基づいて、曲げ破壊先行型の鉄筋コンクリート橋脚に対する終局変位以後の耐力の低下率、除荷曲線の勾配の推定方法を検討した結果を報告するものである。

## 2. 解析に用いた供試体および載荷実験

解析に用いたのは、建設省土木研究所で行われた18体<sup>2)</sup>および東京工業大学で実施した2体<sup>3)</sup>のRC橋脚模型の正負交番載荷実験結果である。これらの特性は表-1に示す通りであり、いずれも橋脚基部で曲げ破壊が先行した供試体である。変位制御により変位振幅漸増型の載荷を行った。せん断支間比、帯鉄筋比、軸圧縮応力度、同一変位振幅における載荷繰り返し回数を変化させている。

## 3. 耐力低下勾配の評価

### (1) 耐力低下勾配の定義

耐力低下勾配とは、履歴曲線の包絡線が最大耐力付近で安定している段階から耐力が急速に低下し始める領域(耐力低下域)における包絡線の勾配である。なお、同一変位振幅で複数の繰り返し載荷を行った場合には、各振幅変位のうちの第1サイクルに相当する最大、最小変位を用いている。

### (2) 耐力低下勾配に及ぼす影響

#### a) 帯鉄筋比の影響

載荷繰り返し回数 $n=10$ 回、軸圧縮応力度 $\sigma=0$ の供試体を取り出して、耐力低下勾配が帯鉄筋比によってどのように変化するかを示した結果が図-1である。せん断支間比が3.3以上と曲げ破壊タイプの供試体では、帯鉄筋比が増加すると耐力低下勾配は多少大きくはなるが、それほど著しいものではない。この理由は、終局変位以降の耐力低下領域では、帯鉄筋による拘束は失われており、このようになると帯鉄筋比が耐力低下勾配に及ぼす影響が少なくなるためと考えられる。したがって、ここでは曲げ破壊先行型の橋脚を対象としていることから、せん断支間比が3.3以上の供試体に対する結果に判断の重心を置き、耐力低下勾配は帯鉄筋比によらないと仮定する。

#### b) せん断支間比の影響

図-1に示した耐力低下勾配をせん断支間比との関係から見直してみると、上述したように、帯鉄筋

表－１ 解析に用いた供試体

| 供試体  | 断面寸法<br>D×W<br>(cm) | 橋脚高さ<br>h<br>(cm) | せん断<br>支間比<br>a/d | 主鉄筋比<br>(%) | 帯鉄筋比<br>$\rho_s$<br>(%) | 繰り返し<br>回数<br>(回) | 軸圧縮<br>応力度<br>$\sigma$ (MPa) |
|------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------|-------------------------|-------------------|------------------------------|
| P-10 | 50×50               | 250               | 5.4               | 2.03        | 0.24                    | 10                | 0                            |
| P-11 | 50×50               | 250               | 5.4               | 2.03        | 0.47                    | 10                | 0                            |
| P-12 | 50×50               | 250               | 5.4               | 2.03        | 0.47                    | 10                | 0                            |
| P-13 | 50×50               | 250               | 5.4               | 2.03        | 0.74                    | 10                | 0                            |
| P-16 | 50×50               | 250               | 5.4               | 2.03        | 0.24                    | 10                | 0                            |
| P-17 | 50×50               | 175               | 3.8               | 2.03        | 0.24                    | 10                | 0                            |
| P-19 | 50×50               | 250               | 5.4               | 2.03        | 0.24                    | 3                 | 0                            |
| P-20 | 50×50               | 175               | 3.8               | 2.03        | 0.24                    | 3                 | 0                            |
| P-22 | 50×50               | 250               | 5.4               | 2.03        | 0.24                    | 5                 | 0                            |
| P-25 | 50×50               | 116               | 2.5               | 2.03        | 1.18                    | 10                | 0                            |
| P-26 | 50×50               | 116               | 2.5               | 2.03        | 2.37                    | 10                | 0                            |
| P-28 | φ56.4               | 250               | 4.7               | 2.03        | 0.24                    | 10                | 0                            |
| P-29 | φ56.4               | 175               | 3.3               | 2.03        | 0.24                    | 10                | 0                            |
| P-31 | φ56.4               | 250               | 4.7               | 2.03        | 2.37                    | 10                | 0                            |
| P-32 | φ56.4               | 175               | 3.3               | 2.03        | 2.37                    | 10                | 0                            |
| P-36 | 50×50               | 250               | 5.4               | 2.03        | 0.24                    | 10                | 0.49                         |
| P-57 | 50×50               | 250               | 5.4               | 2.03        | 0.24                    | 10                | 0.98                         |
| P-58 | 50×50               | 250               | 5.4               | 2.03        | 0.24                    | 10                | 1.96                         |
| TP-1 | 40×40               | 125               | 3.5               | 1.58        | 0.57                    | 3                 | 0.98                         |
| TP-2 | 40×40               | 125               | 3.5               | 1.58        | 0.57                    | 1                 | 0.98                         |

比の影響に関しては今後検討が必要であるが、せん断支間比が3.3以上の供試体に着目すると、明らかに耐力低下勾配はせん断支間比が増加するにつれて小さくなるのがわかる。

### c) 軸圧縮応力度の影響

耐力低下勾配が軸圧縮応力度によってどのように変化するかを示した結果が図－2である。ここでは、載荷繰り返し回数 $n=0$ 回、せん断支間比 $a/d=5.4$ の供試体に対する結果を示している。これから、軸圧縮応力度が増加するにつれて耐力低下勾配は大きくなるのがわかる。

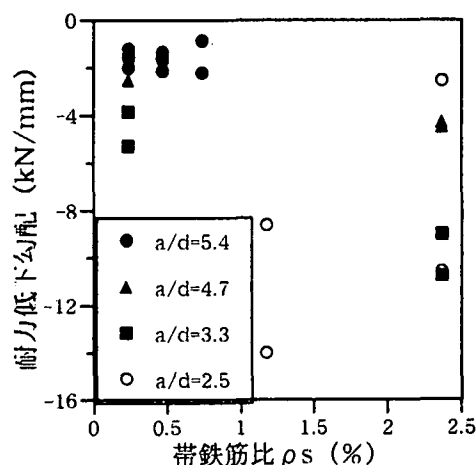
### d) 載荷繰り返し回数の影響

図－3には、耐力低下勾配が載荷繰り返し回数によってどのように変化するかも示している。ここでは、せん断支間比 $a/d=5.4$ 、軸圧縮応力度 $\sigma=0$ の場合を対象としている。これから、載荷繰り返し回数が増加するにつれて耐力低下勾配はほぼ直線的に増加するのがわかる。ただし、今回の定式化では、道路橋示方書と同じように、具体的な繰り返し回数を考えるのではなく、繰り返し回数の多いタイプⅠと少ないタイプⅡに分けて考えることとした。

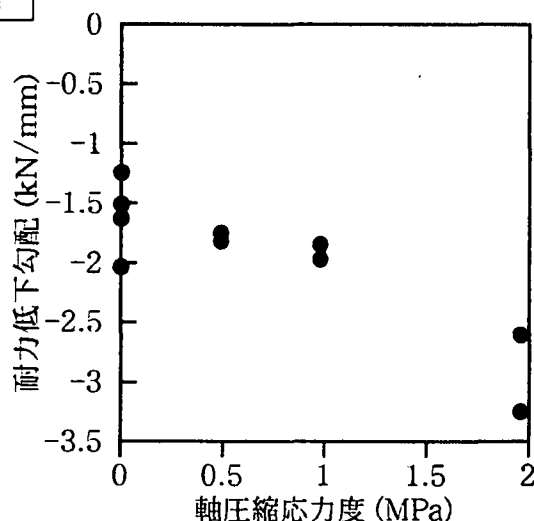
### (3) 耐力低下勾配の定式化

以上の検討より耐力低下勾配を定式化すると次式のようになる。

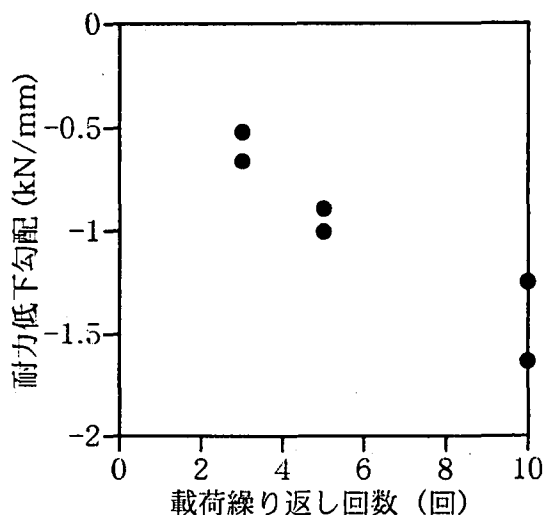
$$K_d(a/d, n, \sigma) = \{9.7 \ln(a/d) - 18\} \times (0.19\sigma^2 + 0.04\sigma + 1) \times \begin{cases} 1.0 & \text{Type I} \\ 0.5 & \text{Type II} \end{cases} \quad (1)$$



図－1 帯鉄筋比と耐力低下勾配の比較



図－2 軸圧縮応力度と耐力低下勾配との比較



図－3 載荷繰り返し回数と耐力低下勾配との比較

式（１）を、今回の解析に用いた 20 体の供試体に適用した結果が図－４である。実験値と計算値を比較すると、多少のばらつきはあるものの、おおむね両者は一致しているのがわかる。

#### 4. 除荷剛性の評価

##### (1) 除荷剛性の定義

荷重を反転すると、荷重～変位の関係は骨格曲線から離れて別のパスを通る。これを除荷曲線という。ここでは、載荷が反転した点と荷重が 0 になる点を結んだ直線を除荷剛性  $K_1$  と定義する。なお、同一振幅で複数の繰返し載荷を行った場合には、各振幅変位における第 1 サイクルに対する値を用いる。さらに、降伏剛性  $K_y$  で除荷剛性  $K_1$  を正規化して、除荷剛性比を定義する。

##### (2) 除荷剛性比に及ぼす影響

じん性率～除荷剛性比の関係が帯鉄筋比、せん断支間比、軸圧縮応力度、載荷繰返し回数によってどのように変化するかを示した結果が図－５～図－８である。帯鉄筋比を特別に大きくした場合や、載荷繰返し回数が少ないほど、多少同一じん性率に対する除荷剛性が大きくなる傾向があるが、これはそれほど著しいものではない。したがって、全般的には除荷剛性比に及ぼすこれらの影響は小さいと言える。

##### (3) 除荷剛性の定式化

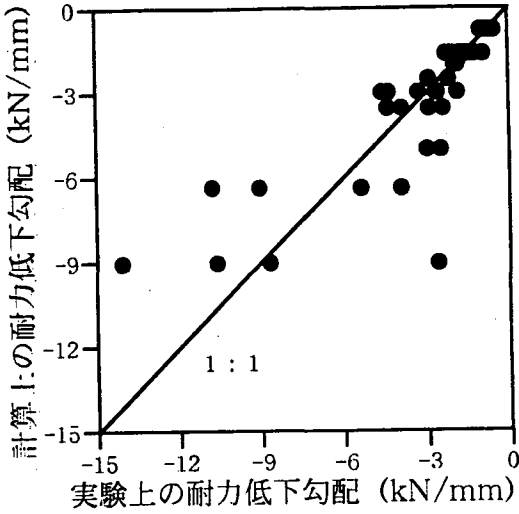
以上のように、帯鉄筋比、せん断支間比、軸圧縮応力度、載荷繰返し回数が除荷剛性比に及ぼす影響はそれほど著しくないことがわかった。このため、こうした条件によって場合分けせずに除荷剛性比を求めることとする。

図－９は、じん性率～除荷剛性比の関係を示したものである。じん性率が大きくなるにつれて、除荷剛性比は対数曲線的に減少するので、これを回帰すると、

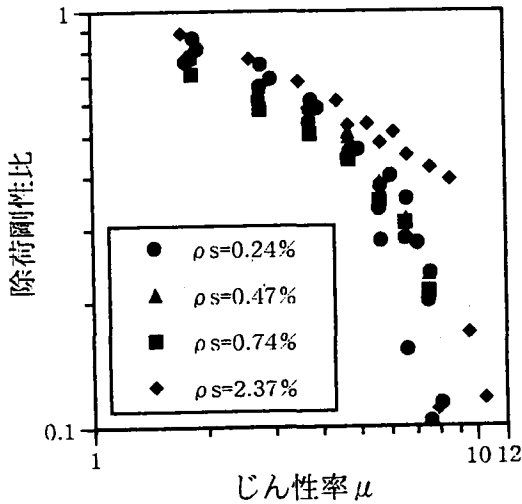
$$K_1 / K_y = -0.345 \ln \mu + 1 \tag{2}$$

この関係を示した結果が図－９中の実線であり、実験値の特徴を良く表している。

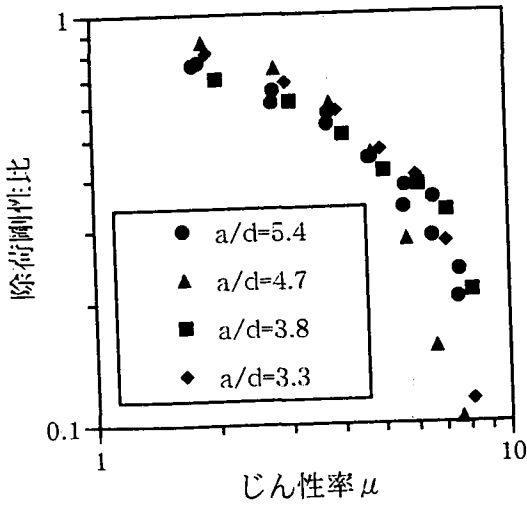
#### 5. 提案モデルの適用性の検討



図－４ 耐力低下勾配の実験値と計算値の比較



図－５ 帯鉄筋比が除荷剛性比に及ぼす影響



図－６ せん断支間比が除荷剛性比に及ぼす影響

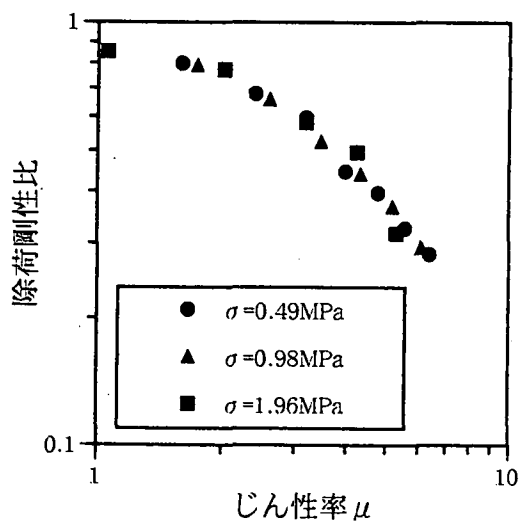


図-7 軸圧縮応力度が  
除荷剛性比に及ぼす影響

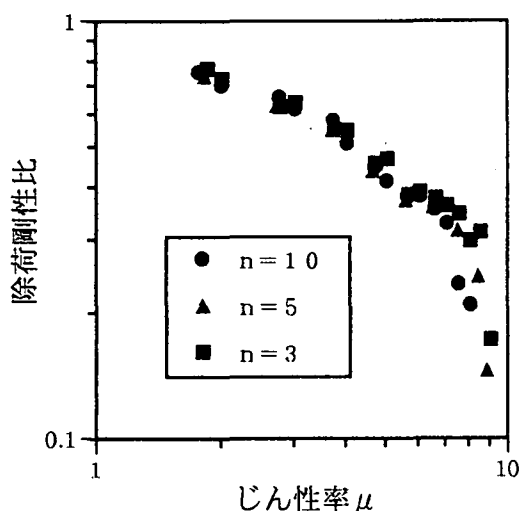


図-8 荷重繰り返し回数が  
除荷剛性比に及ぼす影響

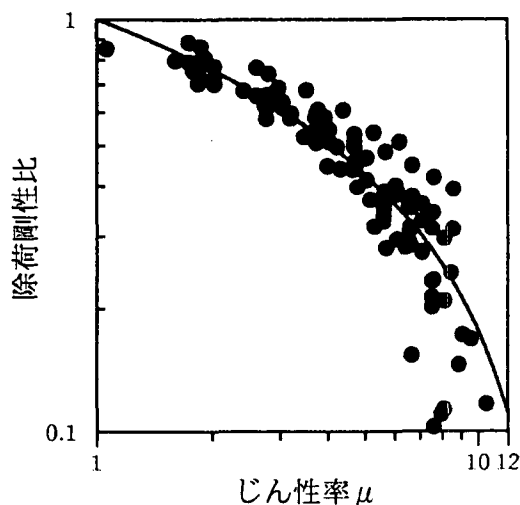


図-9 じん性率と除荷剛性比の関係

以上、耐力低下勾配、除荷剛性について検討してきたが、この結果を組み合わせることでRC橋脚の履歴モデルが提案できる。すなわち、文献1)による終局変位から、3.に示した耐力低下勾配を有する直線を引くことで履歴曲線の包絡線を描くことができ、そしてその包絡線上の任意の地点から、4.に示した除荷剛性を有する直線を引くことでその履歴曲線を表すことができるわけである。紙面の都合上、全供試体に対する履歴曲線と提案モデルとの比較図は割愛するが、全体的な傾向として両者はおおよそ一致していた。

## 6. 結論

RC橋脚模型の正負交番荷重実験結果に基づいて、曲げ破壊先行型の鉄筋コンクリート橋脚に対する終局変位以後の耐力の低下率、除荷曲線の勾配の定式化を行い、RC橋脚用非線形履歴モデルの提案を試みた。その結果、実験結果の履歴曲線をほぼ表すことが可能になった。

## 参考文献

- 1) 武村浩志, 川島一彦, 運上茂樹, 星隈順一: 繰り返し荷重実験に基づくRC橋脚の終局変位の評価, 構造工学論文集 Vol.43A, 1997.3
- 2) 川島一彦, 長谷川近二, 長島博之, 小山達彦, 吉田武史: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査法の開発に関する研究, 土木研究所報告, 第190号, 建設省土木研究所, 1993.9
- 3) 武村浩志, 川島一彦: 荷重履歴特性が鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす影響, 構造工学論文集 Vol.43A, 1997.3