

論文 純ねじりを受ける R C 部材の復元力特性の定式化

大塚 久哲^{*1}・王 堯^{*2}・石原 眞一^{*3}・吉村 徹^{*4}

本研究では純ねじりを受ける R C 部材の耐震性能を把握するとともに、動的解析において必要とされる復元力モデルを提案することを目的としている。その履歴復元力特性およびエネルギー吸収性能を得るために、一般的な R C 橋脚をモデルとした模型供試体を初期軸応力度と帯鉄筋量などをパラメータとして制作し、純ねじり交番載荷実験を行って履歴曲線を得た。その実験結果に基づき、コンクリート部材のねじり復元力モデルを提案する。

キーワード：ねじり，R C 部材，復元力特性，履歴ループ

1. はじめに

従来、コンクリート構造においてねじりモーメントの影響は2次的なものとしてあまり重要視されてこなかった。しかし、最近では橋軸直角方向に偏心した逆 L 型の R C 道路橋脚が建設されるようになり、また、鉄筋コンクリート橋梁の長大化に伴ってねじりモーメントの作用を適切に考慮しなければならない場合も生じており、ねじり荷重を受ける部材の耐震安全性の確保が重要な課題となっている。

地震動に対して非線形時刻歴応答解析を行う場合、精度の良い履歴復元力モデルが不可欠である。しかしながら、既往の研究では R C 部材のねじり耐力、曲げ・せん断に対する影響等を検討しているが、ねじりを受ける R C 部材の非線形復元力特性についての知見は少なく、また、R C 部材のねじり復元力モデルは提案されていない現状である。

以上の背景から、著者らは既に純ねじりを受ける R C 部材の耐震性能を把握するために、一般的な R C 橋脚をモデルとした模型供試体を初期軸応力度、帯鉄筋量、主鉄筋配置、コンクリート強度等をパラメータとして制作し、その正負純ねじり交番載荷実験を行って履歴曲線を得ている⁴⁾。本文ではその実験結果に基づき、動的解析において必要となる R C 部材のねじり復元力モデルを提案するものである。

2. 実験概要と実験結果

(1) 供試体の概要

実験に用いた供試体の外形寸法を図1に示す。断面は正方形とし、局部破壊を避けるために両端にフーチングを付けた。ここで復元力特性の検討に用いた検討ケースは、既往の実験ケース（計11体）から履歴特性に及ぼす影響の大きい軸力（軸方向圧縮荷重）、帯鉄筋量の異なる表1に示すような6体の供試体を選択した。供試体 No.1 を基本ケースとして各供試体の特徴を以下に述べる。

No.2, 3 は、No.1 とコンクリート強度、主鉄筋、

帯鉄筋量の構成は同じである。異なる点は、No.1 供試体が軸力のない状態でねじり載荷を行うのに対し、No.2 は設計基準強度の5%、No.3 は同じく10%の軸力を作用させた状態で載荷させたことである。

No.11, 4, 7 は、No.1, 2, 3 の帯鉄筋間隔が 30mm であるのに対し、60mm としている。帯鉄筋間隔 30, 60mm の場合、帯鉄筋の体積比はそれぞれ $P_t=0.96\%$ 、 0.48% になる。これらの供試体の結果を用いて初期軸応力度および帯鉄筋の体積比をパラメータとした履歴ループの定式化を検討する。

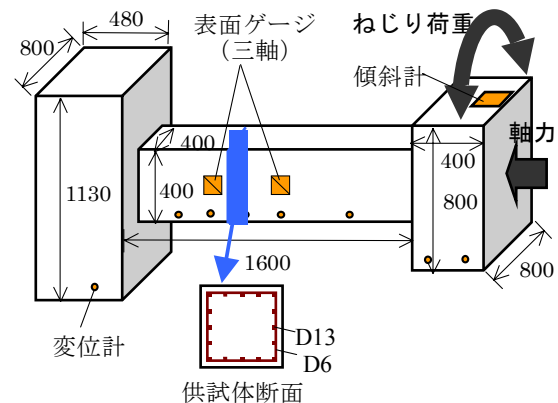


図1 供試体概要（単位 mm）

表1 実験供試体の検討ケース一覧

供試体 No.	設計基準強度 (N/mm ²)	軸力 (Mpa)	帯鉄筋	軸方向鉄筋
1	40	0.0(0%)	D6 ctc30	D13 均等
2	40	2.0(5%)	D6 ctc30	D13 均等
3	40	4.0(10%)	D6 ctc30	D13 均等
11	40	0.0(0%)	D6 ctc60	D13 均等
4	40	2.0(5%)	D6 ctc60	D13 均等
7	40	4.0(10%)	D6 ctc60	D13 均等

注: ctc30 は横方向間隔が 30mm であることを示す。

*1 九州大学大学院工学研究院教授 工博（正会員）

*2 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻

*3 (株) 構造計画研究所 熊本構造計画研究所 応用力学室

*4 (株) オリエンタル建設 福岡支店



写真1 載荷装置と供試体

(2) 実験装置

写真1は純ねじり載荷装置のフレームにセットした供試体を示す。供試体は12本のP C鋼棒（プレストレス各78kN）で供試体の基部フーチングをフレームに固定し、20本の高力ボルトで供試体の頭部を頭部架台に固定する。

軸力用ジャッキから球面用先端金具、回転シャフトとねじり載荷用頭部架台を介して、供試体に軸力をかける。回転シャフトはシャフトケースの中で軸方向にスライド移動でき、供試体の軸方向長さが変化しても一定軸力を作用させ続けることができる。

ポンプからの油圧を2本のねじり載荷用ジャッキに等しく伝達させることで、純ねじり荷重を発生させ交番載荷実験を行う。

交番載荷としては、1往復目は正負方向にそれぞれひび割れ発生まで載荷した。2往復目以降は載荷する振幅（各ループの最大ねじり角、 $\pm \theta$

max）を徐々に増加させた。

(3) 使用材料

コンクリートの目標強度は表1に示すように40N/mm²とした。鉄筋はSD295を使用した。主鉄筋は表1に示すようにD13とした。D6（帯筋）の降伏ひずみは0.2%オフセット法による。

(4) 実験結果

図2～7に各供試体のT - θ 曲線を示す。図には実験で得られたひび割れ発生点、降伏点、最大耐力点を結んだスケルトンを併記した。これらの具体的な数値を表2に示す。スケルトンの計算値については、現在検討中⁴⁾であり、本論文の主題ではないので、ここでは述べない。

(5) 履歴特性の特徴

実験結果より、純ねじりを受けるRC部材の履歴ループは全体として原点志向型に近いことが示された。ただし最大耐力以前の履歴ループは、除荷勾配と載荷勾配がほぼ等しく、原点志向のない紡錘型であり、塑性率の増加とともにS字型の履歴ループとなっていることがわかる。

これに対し、曲げを受けるRC部材に対する武田モデル¹⁾は、除荷時の戻り勾配がモーメント0の点まで一定であるため、本実験の挙動を表現できない。岡本モデル²⁾でも第3剛性に入ると武田型と同じように除荷時戻り勾配が一定であるため、やはり実験結果と異なるループになる。

この結果、本実験結果から得られた履歴ループは、既存の履歴モデルによる表現が困難であると判断した。

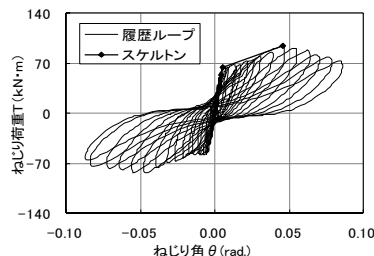


図2 骨格曲線 (No.1)

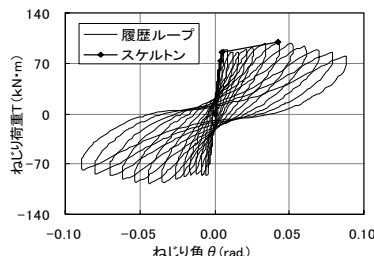


図3 骨格曲線 (No.2)

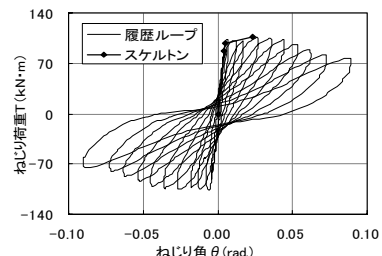


図4 骨格曲線 (No.3)

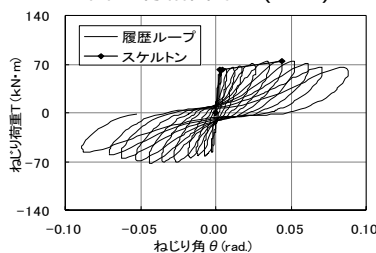


図5 骨格曲線 (No.11)

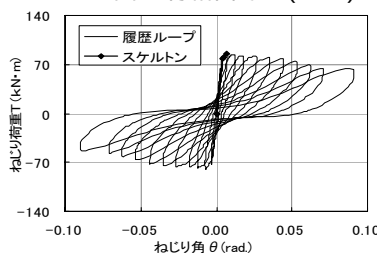


図6 骨格曲線 (No.4)

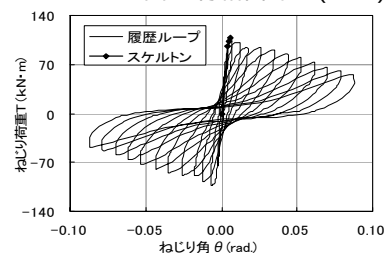


図7 骨格曲線 (No.7)

表2 骨格曲線の諸数値（実験値）

No.	ひび割れ発生		降伏点		最大耐力		降伏点から最大耐力点までの勾配 (kN・m / rad)
	ねじり角 (rad)	荷重 (kN・m)	ねじり角 (rad)	荷重 (kN・m)	ねじり角 (rad)	荷重 (kN・m)	
1	0.0044	53.5	0.0054	63.6	0.0456	93.6	746
2	0.0037	72.7	0.0047	85.6	0.0424	99.1	358
3	0.0042	87.6	0.0053	98.5	0.0236	106.1	415
11	0.0030	61.6	0.0049	62.8	0.0439	75.3	367
4	0.0038	78.1	0.0049	81.0	0.0067	85.5	2500
7	0.0044	95.2	0.0050	103.8	0.0061	108.6	4363

3. ねじり復元力モデルの提案

(1) 提案履歴ループのパラメータと特徴

本研究では，前章に示した履歴曲線の特徴よりねじり部材の復元力特性に影響を及ぼす要因として，初期軸応力，帯鉄筋の体積比及び塑性率の3つを提案履歴ループのパラメータとして設定する．手順として，まず減衰定数(h)を塑性率(μ)と初期軸応力(N_0)及び帯鉄筋の体積比(P_t)の関数として実験結果より決定する．次に，供試体ループ特有のくびれを表現できる除荷曲線関数を，種々の関数の組み合わせを吟味して決定する．提案する復元力モデルの概念図を図8に示す．

(2) 塑性率 μ と等価減衰定数 h の相関図

供試体ごとに，ねじり荷重 T とねじり角 θ

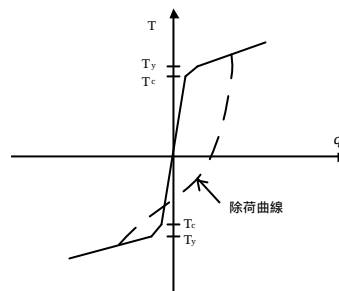


図8 履歴ループの概念図

の関係を，ねじり角塑性率 μ 20の履歴ループにて確認し，等価減衰定数を算出した．ねじり角塑性率 μ は，最大ねじり角 θ_{max} を各供試体の降伏時ねじり角 θ_y で除した値とする．塑性率 μ と等価減衰定数 h の関係を図9～図14に示す．

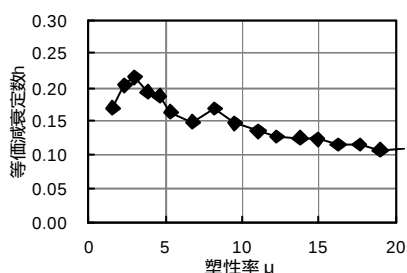


図9 塑性率 - 等価減衰定数の関係図 (No.1)

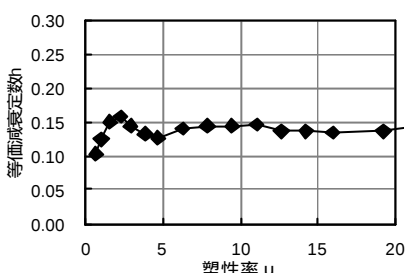


図10 塑性率 - 等価減衰定数の関係図 (No.2)

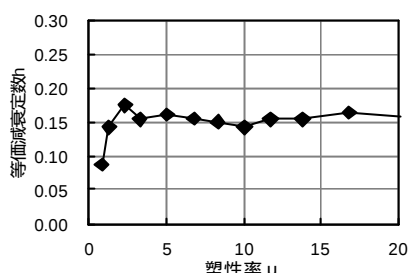


図11 塑性率 - 等価減衰定数の関係図 (No.3)

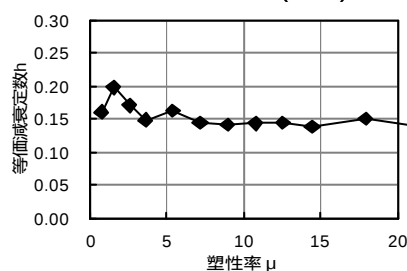


図12 塑性率 - 等価減衰定数の関係図 (No.11)

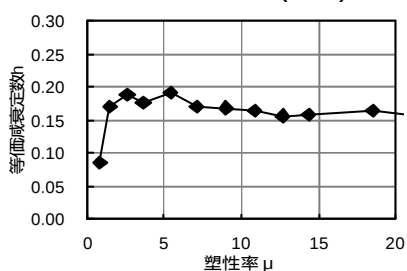


図13 塑性率 - 等価減衰定数の関係図 (No.4)

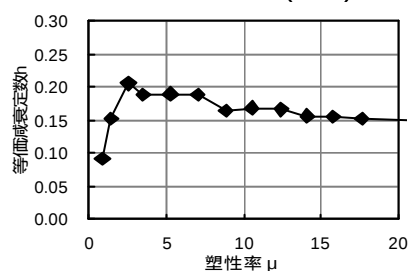


図14 塑性率 - 等価減衰定数の関係図 (No.7)

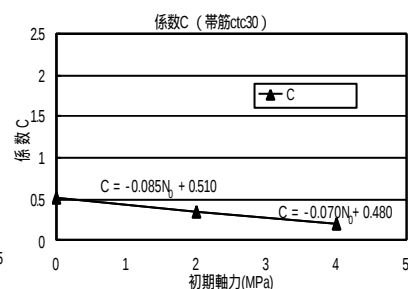
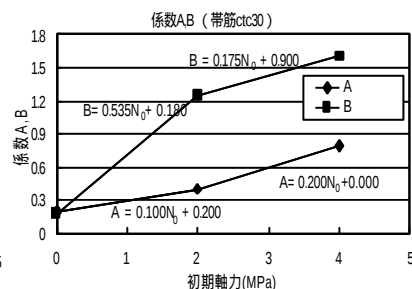
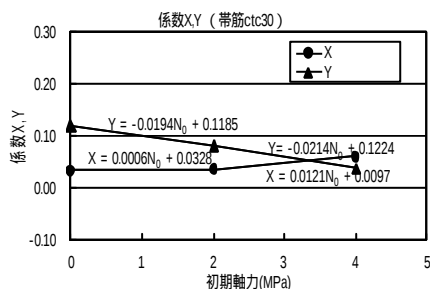


図15 係数X,Y,A,B,C (No.1～3)

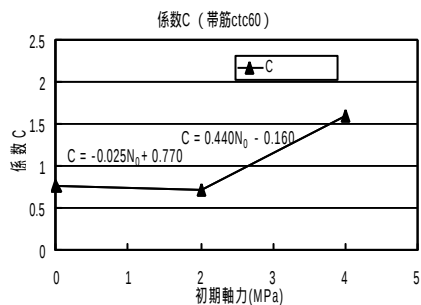
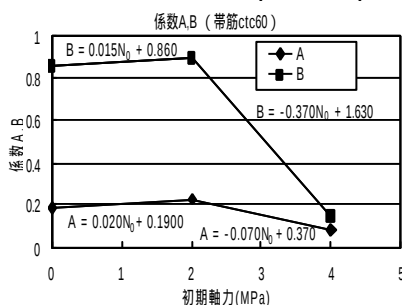
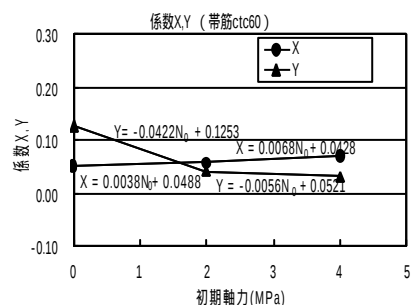


図16 係数X,Y,A,B,C (No.11,4,7)

(3) 等価減衰定数 h の関数近似

図9～図14のプロット図の形状に鑑み、各供試体における等価減衰定数 h を、塑性率 $\mu = 1$ を境として式(1-1)のように表現することとした。

$$h = \begin{cases} X + Y & (\mu < 1) \\ \min(X \cdot \mu + Y, A \cdot (C + e^{-B \cdot \mu})) & (\mu \geq 1) \end{cases} \quad (1-1)$$

ここに、 X, Y, A, B, C は実験定数である。

式(1-1)を用いて算出した等価減衰定数と実験結果から求めた等価減衰定数が一致するように、まず No.1～3 の3つの供試体に対し、係数 X, Y, A, B, C を求めると図15のプロットを得る。ここで各係数の具体的な数値は表3の上3段に示している。実験は $N_0 = 0, 2, 4$ MPa の3ケースであるが、 $N_0 = 2$ を中点としてそれぞれの係数が直線的に変化すると仮定すると図中に示すような直線で表わせる。

同様に、No.11, 4, 7 の3つの供試体に対し、係数 X, Y, A, B, C を求めると、図16のプロットを得る。ここで各係数の具体的な数値は表3の下3段に示している。ここでも $N_0 = 2$ を中点としてそれぞれの係数が直線的に変化すると仮定すると図中に示すような直線で表わせる。

これらの係数式を用いて算出した等価減衰定数と実験結果から求めた等価減衰定数との一致度を図18から図23まで示す。(図中凡例の**は累乗を示す)

ここで改めて、係数 X, Y, A, B, C を初期軸応力度 N_0 (MPa) と帯鉄筋の体積比 P_t を変数とする関数で表すことを考える。定式化は2パラメータであることから、各係数と初期軸応力度 N_0 と帯鉄筋量 P_t は、3次元空間での相関となる。

定式化の方法を2 $N_0 < 4$ 区間の係数 A を例にとって説明する。図17に示すように、まず、No.2, 3の係数 A と No.4, 7の係数 A をプロットし、それぞれ直線で結ぶ。この2つの直線より、 $N_0 = N_1$ なる任意点 M_1 と M_2 をそれぞれ求め、その間を直線と仮定する。この直線上で、 $P_t = P_{t1}$ なる点の係数 A を算出する式を求める。

ここで算出式は $N_0 P_t, N_0, P_t$ および定数項からなるものとし、各頂の係数を求めた。他の係数 X, Y, B, C においても、同様である。結局、各係数と初期軸応力度 N_0 と帯鉄筋の体積比 P_t の相関式は、式(1-2)～式(1-6)で表せるものとした。

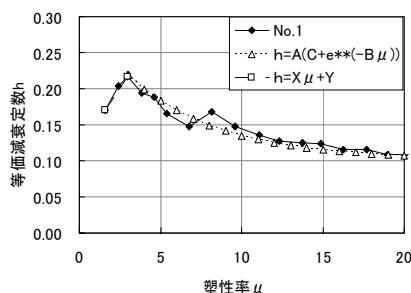


図18 塑性率 - 等価減衰定数の関係図 (No.1)

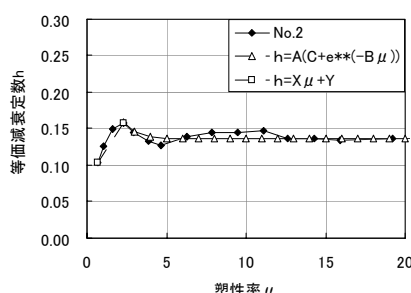


図19 塑性率 - 等価減衰定数の関係図 (No.2)

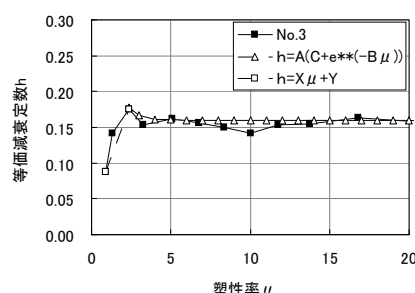


図20 塑性率 - 等価減衰定数の関係図 (No.3)

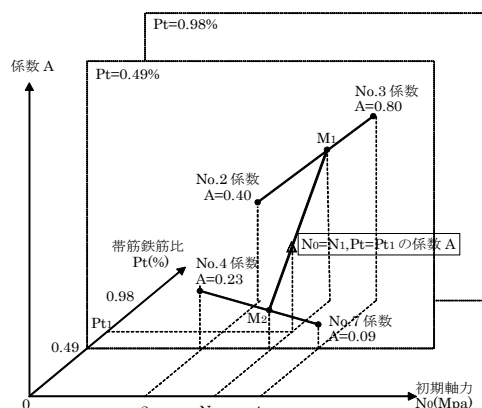


図17 定式化説明図

表3 係数 X, Y, A, B, C

供試体	X	Y	A	B	C	軸応力度 N_0 (Mpa)	帯鉄筋の体積比 P_t
No.1	0.0328	0.1185	0.200	0.180	0.510	0	0.0098
No.2	0.0339	0.0797	0.400	1.250	0.340	2	0.0098
No.3	0.0581	0.0368	0.800	1.600	0.200	4	0.0098
No.11	0.0488	0.1253	0.190	0.860	0.770	0	0.0049
No.4	0.0564	0.0409	0.230	0.890	0.720	2	0.0049
No.7	0.0700	0.0297	0.090	0.150	1.600	4	0.0049

$$X = \begin{cases} -0.653 N_0 P_t + 0.007 N_0 - 3.265 P_t + 0.0648 & (N_0 < 2) \\ 1.082 N_0 P_t + 0.0015 N_0 - 6.755 P_t + 0.0759 & (N_0 \geq 2) \end{cases} \quad (1-2)$$

$$Y = \begin{cases} 4.653 N_0 P_t - 0.0650 N_0 - 1.388 P_t + 0.1321 & (N_0 < 2) \\ -3.225 N_0 P_t + 0.0102 N_0 + 14.35 P_t - 0.018 & (N_0 \geq 2) \end{cases} \quad (1-3)$$

$$A = \begin{cases} 16.33 N_0 P_t - 0.060 N_0 + 2.041 P_t + 0.1800 & (N_0 < 2) \\ 55.10 N_0 P_t - 0.340 N_0 - 75.51 P_t + 0.7400 & (N_0 \geq 2) \end{cases} \quad (1-4)$$

$$B = \begin{cases} 106.1 N_0 P_t - 0.5050 N_0 - 138.8 P_t + 1.540 & (N_0 < 2) \\ 111.2 N_0 P_t - 0.9150 N_0 - 149.0 P_t + 2.360 & (N_0 \geq 2) \end{cases} \quad (1-5)$$

$$C = \begin{cases} -12.25 N_0 P_t + 0.035 N_0 - 53.06 P_t + 1.030 & (N_0 < 2) \\ -104.1 N_0 P_t + 0.950 N_0 + 130.6 P_t - 0.800 & (N_0 \geq 2) \end{cases} \quad (1-6)$$

(4) 履歴ループの関数近似

No.1～3, No.11, 4, 7 の計6つの供試体の履歴ループの形状を観察し、これまでの研究³⁾も参考に、式(2-1)～式(2-6)のように除荷関数式を仮定する。

$$f = C' \cdot y_1 + (1 + C') \cdot y_2 \quad (2-1)$$

ここに、

$$y_1 = \sin(-1.5\pi \cdot x^p) \quad (2-2)$$

$$y_2 = 1 - e^{-qx} \quad (2-3)$$

$$C' = \frac{2 \cdot \beta + 1 - 0.5 \cdot \pi \cdot h}{2(\alpha + \beta + 1)} \quad (2-4)$$

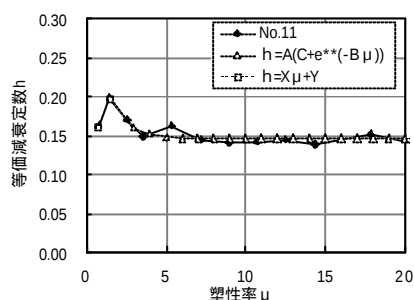


図 21 塑性率 - 等価減衰定数の関係図 (No.11)

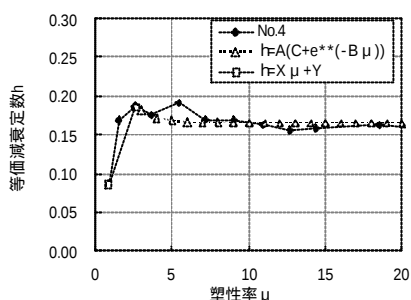


図 22 塑性率 - 等価減衰定数の関係図 (No.4)

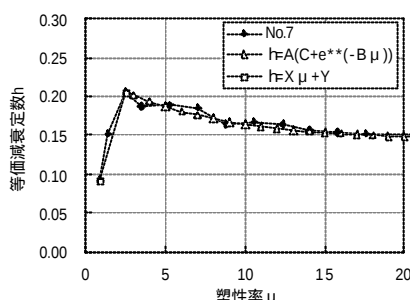


図 23 塑性率 - 等価減衰定数の関係図 (No.7)

ここで,

$$a = \frac{1}{p(1.5p)^{1/p}} \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ (-1)^m \frac{(1.5p)^{1/p+2m+1}}{(2m+1)!(1/p+2m+1)} \right\} \quad (2-5)$$

$$b = \frac{1}{q} (e^{-q} - 1) \quad (2-6)$$

式(2-1)を用いて算出した履歴ループと実験結果の履歴ループが一致するように、No.1～3の3つの供試体及びNo.11,4,7の3つの供試体に対し、別々に係数p,qを求めると、図24及び25を得る。ここで各係数の具体的な数値は表4に示している。この図から、係数p,qはともに初

$$p = \begin{cases} 5.102N_0P_t - 0.150N_0 - 12.04P_t + 1.600 & (N_0 < 2) \\ -12.25N_0P_t + 0.070N_0 + 24.49P_t + 1.160 & (N_0 \geq 2) \end{cases} \quad (2-7)$$

$$q = \begin{cases} -20.41N_0P_t + 0.200N_0 - 163.3P_t + 5.600 & (N_0 < 2) \\ 30.61N_0P_t - 0.050N_0 - 265.3P_t + 6.100 & (N_0 \geq 2) \end{cases} \quad (2-8)$$

期軸応力 N_0 を変数とする直線で表せると仮定すると、図中に示す直線を得る。

さらに、等価減衰定数の関係近似と同様に、係数p,qを初期軸応力 N_0 と帯鉄筋の体積比 P_t を変数とする関数で表すと式(2-7)、(2-8)で表せる。

ここで、No.2とNo.4供試体において、関数近似による曲線と実験による履歴ループの比較を行った。その結果を図26,27に示す。ここで座標軸は無次元化しており、図8の第1象限から第3象限までのカーブを示している。これらの図から、両者はよく一致していることがわかる。このようにして関数近似した履歴ループから求めた等価減衰定数と実験値との比較を図28～33に示す。図18～23と比較して精度は落ちるが、これは履歴ループを関数近似したことによる。

表 4 係数p,q

供試体	p	q
No.1	1.5	4.0
No.2	1.3	4.0
No.3	1.2	4.5
No.11	1.6	4.8
No.4	1.3	5.0
No.7	1.3	5.2

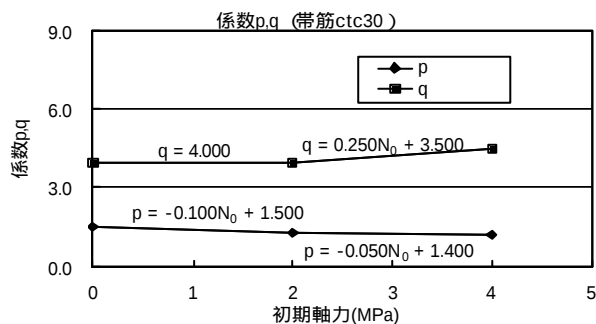


図 24 係数p,q (No.1～3)

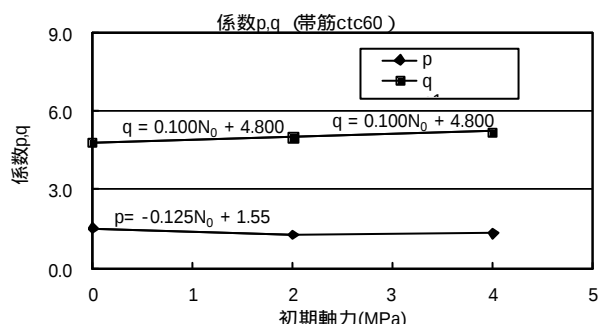


図 25 係数p,q (No.11,4,7)

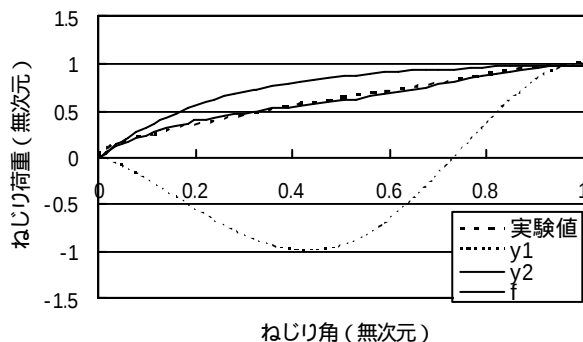


図 26 履歴カーブ (No.2, 塑性率6)

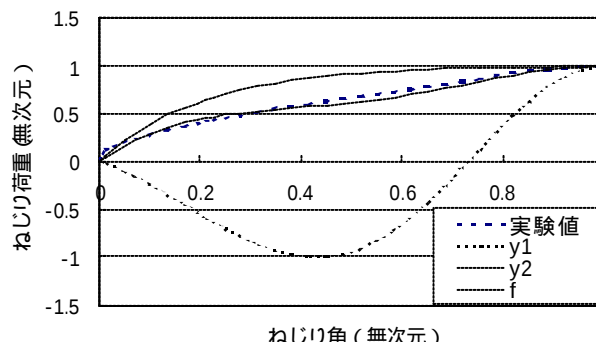


図 27 履歴カーブ (No.4, 塑性率6)

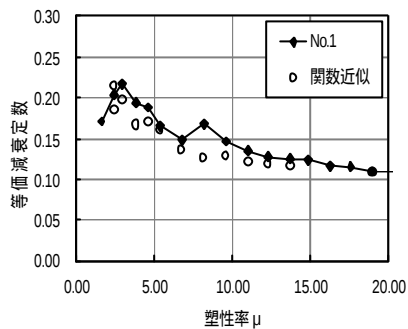


図 32 等価減衰定数の比較 (No.1)

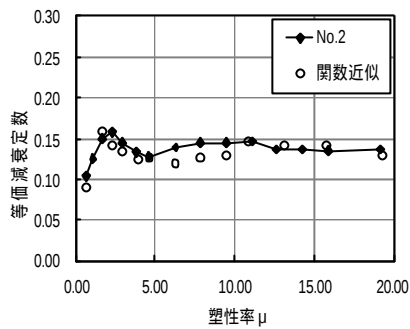


図 33 等価減衰定数の比較 (No.2)

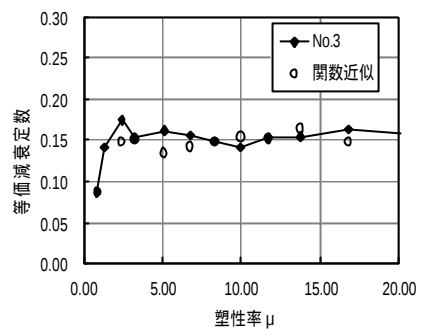


図 34 等価減衰定数の比較 (No.3)

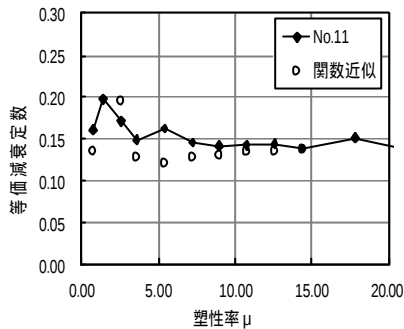


図 35 等価減衰定数の比較 (No.11)

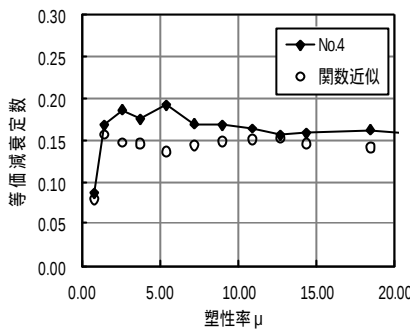


図 36 等価減衰定数の比較 (No.4)

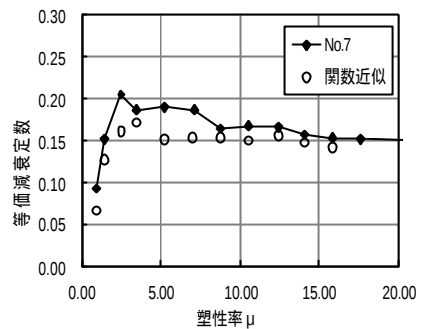


図 37 等価減衰定数の比較 (No.7)

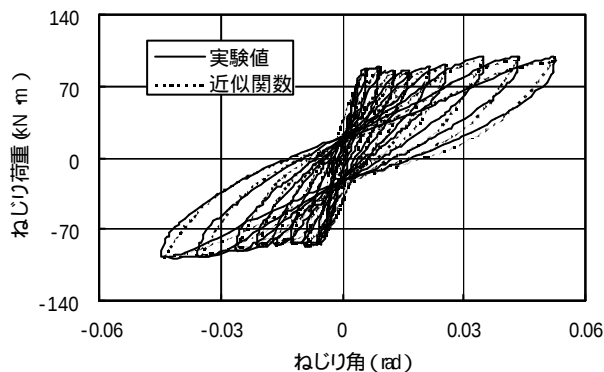


図 38 履歴ループの比較 (No.2)

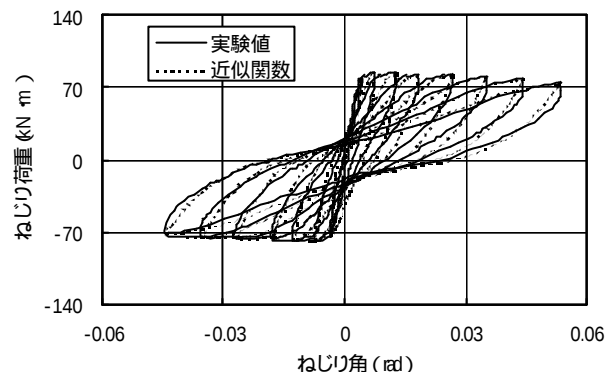


図 39 履歴ループの比較 (No.4)

最後に実験による履歴ループと関数近似による提案ループを供試体 No.2 および No.4 で比較すると、図 38 および図 39 を得る。提案式は図に見られるような精度を有するものである。

4. まとめ

本論文では、純ねじりを受ける RC 部材の交番載荷実験により得られた結果をもとに、純ねじりを受ける RC 部材の復元力特性を提案した。

本研究で提案した復元力特性の特徴についてまとめると以下のようなものである。

- ・ 塑性率 μ により等価減衰定数 h を規定した。
- ・ 規定した等価減衰定数と初期軸応力度、帯鉄筋量によりループの形状を定め、除荷曲線を決定した。

これらの履歴特性は、RC 部材の履歴復元力特性として設計で多用される武田モデルなどと挙動の特性が異なる。本提案モデルと実験結果の比較による検証の結果、供試体に関しては、

その履歴復元力特性をほぼ再現できている。

謝辞

九州大学大学院矢葺亘助手、山崎智彦技官、福岡県庁高田豊輔氏（当時学部4年生）および吉村徹氏（オリエンタル建設（株））には特に実験の実施に関しまして種々の御協力をいただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Takeda, T. et al: Reinforced Concrete Response to simulated Earthquakes, ST12, ASCE, pp.2557-2573, 1970.12
- 2) 岡本, 加藤: PC 造建物の地震応答性状, プレストレストコンクリート, Vol.33, No.4, pp.52-63, 1991
- 3) 大塚, 矢葺, 石原, 浦川, 角本: PC 鋼材が偏心配置される PC 箱桁の復元力特性に関する研究, プレストレストコンクリート, Vol.44, No.1, pp.65-72, 2002.
- 4) 大塚, 王, 高田, 吉村: 純ねじりを受ける RC 部材の履歴特性に影響を及ぼすパラメータに関する実験的研究, 投稿中