

実大 RC 橋脚コンポーネント震動台実験に用いられた 鉄筋の繰り返し弾塑性挙動

葛西昭¹・稲垣冨城²

¹ 正会員 博士(工学) 名古屋大学講師 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

² 学生会員 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

1. 緒言

RC 製橋脚の実大震動台実験が実施され、その成果に関する報告がされつつある^{1,2)}。この実験に用いられている異形棒鋼 (SD345) の材料特性について、繰り返し弾塑性状態に及ぶまで把握しておくことは、RC 構造物の耐震設計等を考える上で、必要不可欠である。

この鉄筋の弾塑性変形挙動を高い精度で予測する力学モデルとしては、Menegott-Pinto モデル³⁾、加藤モデル⁴⁾などが挙げられる。これらのモデルは繰り返し荷重下の特徴であるバウシンガー効果を表現できるモデルである。一方、鋼構造物の繰り返し弾塑性履歴モデル^{例えば 5, 6, 7)}としては、同じくバウシンガー効果を導入し、繰り返し載荷による降伏棚域の減少などを考慮したモデルも構築されている。

本研究では、繰り返し弾塑性履歴モデルとして、名古屋大学で開発された修正 2 曲面モデル⁵⁾を取り上げ、材料特性として、鉄筋の繰り返し弾塑性挙動を予測するとした場合の、材料パラメータを同定し、その精度を検証する。既往のコンクリート中に存在する鉄筋の構成モデルは、例えば、コンクリートの付着挙動や引張載荷時におけるコンクリートのひび割れを考慮するなど、既に一定の成果が公表されて

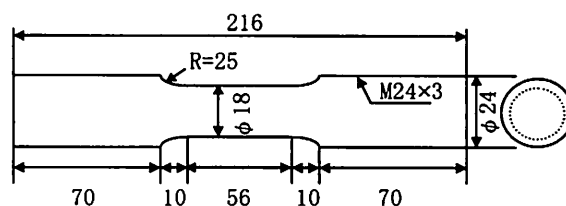


図-1 供試体の概要 (単位: mm)

いるが、本研究では、あくまでも材料特性に限定して検討を行った。そのため、この成果がすぐに RC 構造物に適用できるわけではないので注意されたい。

2. 繰り返し載荷実験に関する概要

鉄筋 (SD345) の繰り返し特性を把握し、修正 2 曲面モデルの材料パラメータを決定するために種々の載荷パターンで繰り返し載荷実験を行った。以下にその概要を示す。

(1) 実験供試体

実験供試体は鉄筋コンクリート用異形棒鋼 SD345 を用いる。異形棒鋼はリブ付き断面を有しているが、荷重の偏心や初期不整による応力一ひずみ関係への影響を防ぐため、供試体の形状は平行部を有する中実丸棒とする。その形状と寸法を図-1 に示す。

表-2 材料定数

供試体	E (GPa)	σ_y (MPa)	ε_y (%)	E_{st}^P (GPa)	ε_{st}^P (%)	σ_u (MPa)	ν
C1-1	202	375	0.186	5.99	1.35	671	0.30
C1-5	200	386	0.193	7.13	0.981	699	0.29

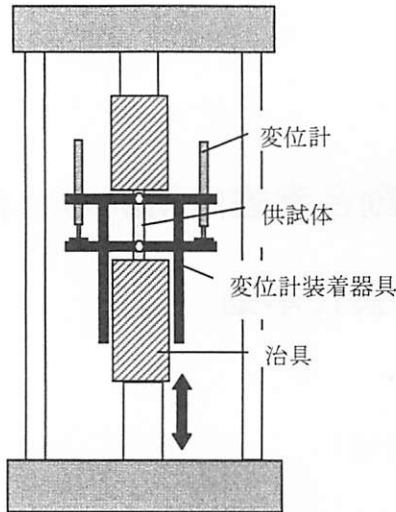


図-2 実験装置の概要

表-1 実験の種類

番号	実験名称
1	単調引張実験
2	弾性域の減少を調べる実験
3	降伏棚の減少を調べる実験
4	境界線に関する実験
5	ランダム载荷実験

(2) 実験装置

実験装置は MTS 社製の疲労試験機（容量 250kN）を用い、供試体を治具にねじ込む方法によって固定した。

測定データは、供試体に载荷される荷重とそれに伴って生じる軸方向変位である。荷重は実験装置に取り付けられているロードセルによって測定し、軸方向変位は、供試体の平行部（標点間距離 50mm）に変位計装着器具を 3 方からねじで固定し、その両側に変位計（CDP-25）を 2 つ取り付け測定する。また、ポアソン比を求めるために、ひずみゲージを供試体の平行部両側に取り付ける。実験装置の概要を図-2 に示す。

(3) 実験方法

繰り返し構成則のパラメータ同定のために表-1 に示すような種類の実験を行う。それぞれ、実験 1

は、単調引張载荷における材料パラメータを決定するための実験、実験 2～4 は、繰り返し特性を表現する材料パラメータ決定のための実験、実験 5 は本提案モデルによる予測結果の検証のための実験である。また、この実験では 5%程度までの大ひずみを扱うため、実験成果をまとめるにあたって、真応力 σ 、対数ひずみ ε 、塑性ひずみ ε^p を用いることとした。

なお、本研究では、当初、同一ロットである C1-1 における試験体から実験 2～4 を実施し、繰り返し特性の把握に努めた。その後、C1-5 については、引張試験のみから得られる材料パラメータを基に C1-1 で得られた繰り返し特性を示す材料パラメータでの予測精度を検証するため、C1-5 については、実験 1 および 5 のみとしている。

3. 鉄筋（SD345）の繰り返し特性の把握と材料パラメータの決定

(1) 単調引張実験

実験結果から得られた材料定数を表-2 に示す。ここで、 E はヤング定数、 σ_y は降伏応力、 ε_y は降伏ひずみ、 E_{st}^P は初期硬化係数、 ε_{st}^P は初期硬化時の塑性ひずみ、 σ_u は引張強度、 ν はポアソン比である。表-2 において、C1-1 は 2007 年に実施された実験に用いられた鉄筋¹⁾、C1-5 は 2008 年に実施された実験に用いられた鉄筋²⁾を示している。これらはそれぞれ 2 体の引張試験の成果から平均をとったものである。

(2) 弾性域の減少を調べる実験

田中ら⁸⁾による一般鋼材（SS400、SM490、SM570）の繰り返し载荷実験結果から、弾性域の大きさは累積相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}^p$ の増加に伴い指数関数的に減

少することが分かっており、修正2曲面モデルでは弾性域の大きさ 2κ と折り返し時における累積相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}^p$ の関係を次式の指数関数で表現している。

$$\kappa/\kappa_0 = \alpha - a \cdot \exp(-b\bar{\varepsilon}^p \times 100) - (\alpha - a - 1) \cdot \exp(-c\bar{\varepsilon}^p \times 100) \quad (1)$$

ここで、 $2\kappa_0$ は初期の弾性域の大きさ ($=2\sigma_y$) を示し、 a 、 b 、 c 及び α は材料パラメータである。また、累積相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}^p$ とは皆川ら⁹⁾の提案によるもので、塑性ひずみ履歴において引張・圧縮両側で過去最大の塑性ひずみを越えた塑性ひずみ増分 $d\varepsilon^p$ を合計した量である。

本実験では、引張・圧縮両側で、半サイクルごとに累積相当塑性ひずみを増加させるような载荷パターンの実験を2体行った。縦軸に弾性域の大きさ、横軸に累積相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}^p$ をとり、実験2の結果をプロットした関係図を図-3に示す。同図には式(1)を利用し、材料パラメータを非線形最小2乗法によって同定した値を使った近似曲線もプロットしてある。この結果より、構造用鋼材 SM490 材で既に利用されている式(1)は、鉄筋においても、ほぼ同様な傾向として利用が可能であることが分かる。このパラメータ同定における具体的な数値については、後述する。

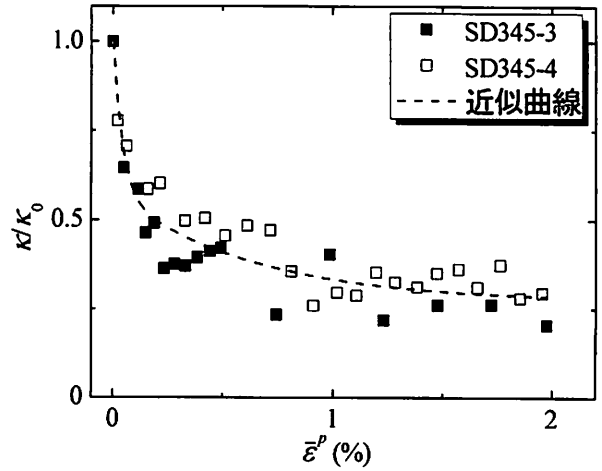


図-3 弾性域の大きさと累積相当塑性ひずみの関係

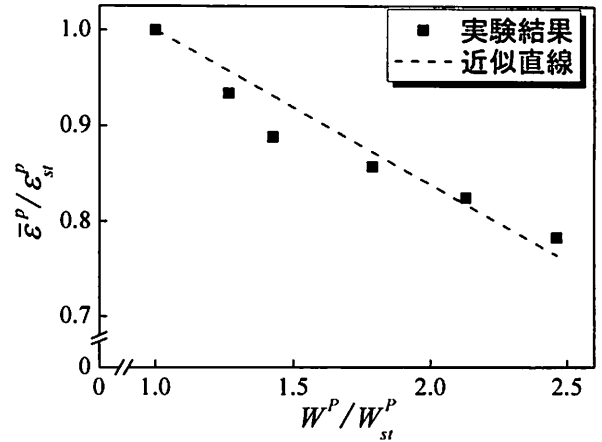


図-4 累積相当塑性ひずみと塑性仕事の関係

(3) 降伏棚の減少を調べる実験

修正2曲面モデルでは、降伏棚の減少及び消失を、降伏棚が消失するまでの累積相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}^p$ と塑性仕事量 W^p ($=\int \sigma d\varepsilon^p$) との関係で、次式のように表現している。

$$\frac{\bar{\varepsilon}^p}{\varepsilon_{st}^p} - 1 = M \cdot \left(\frac{W^p}{W_{st}^p} - 1 \right) \quad (2)$$

ここで、 ε_{st}^p 及び W_{st}^p はそれぞれ単調载荷時におけるひずみ硬化開始までの相当塑性ひずみ及び塑性仕事量であり、 M は材料パラメータである。

本実験では、降伏棚域からひずみ硬化域への遷移が見られるような载荷パターンの実験を、ひずみ硬化までの塑性仕事量を変化させて5体行った。縦軸に $\bar{\varepsilon}^p / \varepsilon_{st}^p$ を、横軸に W^p / W_{st}^p をとり、実験3の全結

果をプロットした関係図を図-4に示す。この図より、前述の弾性域の減少と同様、鉄筋においても SM490 材と同様な傾向が確認できる。なお、図中の近似直線は、式(2)のパラメータを最小2乗法によって算出し、それをプロットしたものである。

(4) 境界線に関する実験

この実験は、形状パラメータ、境界線半径の変化及び境界線の傾きの変化の3項目について調べる実験である。これらの項目の材料パラメータを求めるためには、応力-ひずみ関係が線形になる、つまり境界線に達する位置を決めなければならない。そこで、本研究ではひずみが5%進展すると応力-ひずみ曲線が境界線に達すると仮定した。しかし、実際

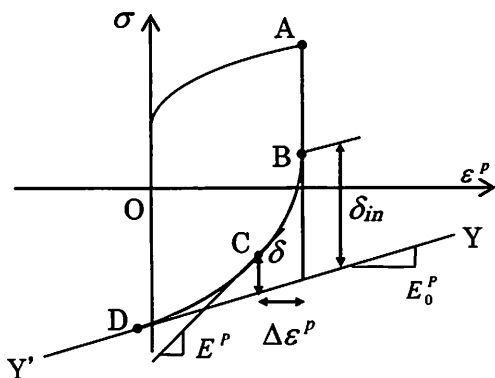


図-5 鋼素材の応力-ひずみ関係

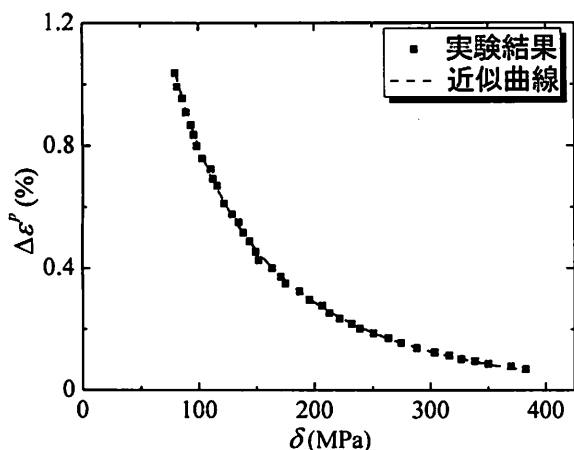


図-6 $\Delta\epsilon^p$ - δ 関係

には境界線に達した後の応力-ひずみ関係は徐々にその傾きを小さくしながら増加する。このため、ひずみの増加が5%を大きく超える場合の予測には対応できないことに注意が必要である。各項目の詳しい内容及び結果を以下に示す。

a) 形状パラメータ

塑性域まで繰り返し応力を受ける鋼素材の一軸状態での応力-塑性ひずみ曲線は、図-5に示すように、弾性域 (AB)、非線形な塑性域 (BD)、さらに定常状態の塑性域 (DY') に分けることができる。弾性域および定常的な塑性域での鋼素材の挙動は、それぞれ弾性係数 E 、定常塑性係数 E_0^p を用いて一次関数で表現できる。修正2曲面モデルでは、これら両領域間 (遷移領域) での非線形曲線の接線塑性係数 E^p を塑性開始点 (B点) から境界線 YY' までの σ 軸に平行な距離 δ_{in} と、遷移領域での任意点 (C点) から境界線 YY' までの σ 軸に平行な距離 δ (現応力

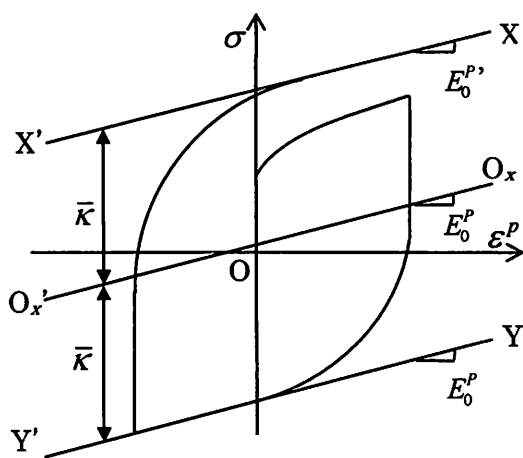


図-7 境界線の移動

と境界線応力との距離) を用いて以下で定義される。

$$E^p = \frac{d\sigma}{d\epsilon^p} = E_0^p + h \frac{\delta}{\delta_{in} - \delta} \quad (3)$$

ここで、 h は形状パラメータと呼ばれ、曲率の度合いを表す。さらに、修正2曲面モデルでは形状パラメータ h も δ の一次関数として

$$h = e\delta + f \quad (4)$$

と定義している。ここで、 e 及び f は材料パラメータである。式(4)を式(3)に代入し、 $E^p = d\sigma/d\epsilon^p$ を用いて、塑性開始点から1ループ中の任意点までの塑性ひずみ増分を積分することにより、塑性開始点から測った任意点での塑性ひずみ増分 $\Delta\epsilon^p$ と任意点から境界線までの距離 δ との関係式を得る。

$$\Delta\epsilon^p = \frac{\delta_{in}}{f} \ln \left(\frac{e\delta + f}{e\delta_{in} + f} \cdot \frac{\delta_{in}}{\delta} \right) + \frac{1}{e} \ln \left(\frac{e\delta + f}{e\delta_{in} + f} \right) \quad (5)$$

形状パラメータを求めるために必要となるのは、降伏棚が消失した後の载荷における、折り返しから想定している境界線に達するまでの载荷を利用する。縦軸に $\Delta\epsilon^p$ を、横軸に δ をとり、実験4の結果をプロットした関係図を図-6に示す。同図には非線形最小2乗法によってパラメータ同定した場合の近似曲線もプロットしてあり、式(5)による塑性ひずみ増分と境界線までの距離に関する相関性が伺える。

b) 境界線の移動

図-7に示すように、修正2曲面モデルでは引張・

圧縮両領域に位置する境界線間の距離（境界線半径 $\bar{\kappa}$ ）は累積相当塑性ひずみの増加に伴い拡大するとし、次式で表わされる。

$$\frac{\bar{\kappa}}{\sigma_y} = \frac{\bar{\kappa}_\infty}{\sigma_y} + \left(\frac{\bar{\kappa}_0}{\sigma_y} - \frac{\bar{\kappa}_\infty}{\sigma_y} \right) \exp \left\{ -\zeta \cdot \varepsilon_y^2 \left(\frac{\rho}{\varepsilon_y} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

ここで、 $\bar{\kappa}_0$ は初期境界線半径、 ζ は定数を表し、これらが材料パラメータである。ただし、 $\rho = 1/2 \bar{\varepsilon}^P$ （ $\bar{\varepsilon}^P$ は折り返し時の累積相当塑性ひずみ）、 $\bar{\kappa}_\infty = \sigma_u$ （引張強度）である。

縦軸に $\bar{\kappa}/\sigma_y$ ，横軸に ρ/ε_y をとり、実験4の結果をプロットした関係図を図-8に示す。境界線半径を表すパラメータを求めるために必要となるのは、境界線に達してから折り返し、さらにその後境界線に達するような曲線である。このため、圧縮側でも境界線に達するまで载荷を行わなければならない。しかし、境界線半径は折り返し時における累積相当塑性ひずみの増加に伴って大きくなるため、累積相当塑性ひずみを増やし過ぎる载荷パターンにすると、圧縮側で境界線に達する前に供試体が座屈する可能性がある。このため、様々な累積相当塑性ひずみにおける境界線半径を得ることは困難であり、本研究では、図-8にあるように実験結果より得られるデータをごく少ないものとなる。また、双方への大きな履歴を受けることで双方の境界線を判断するため、累積相当塑性ひずみの小さい段階では、成果を得るのが困難な状況にある。本研究における実験では、座屈をさせないための試験長を設定してはいるものの、より大きな圧縮側への载荷を施すことと、小さい累積相当塑性ひずみの段階での境界線の挙動をどうとらえるかについて検討が必要と言える。なお、図-8には、式(6)のパラメータを非線形最小2乗法により定めたものを近似曲線としてプロットしておいた。データ点数が少ないため、傾向を正しく評価できているかは不明と言わざるを得ない。

一方、引張・圧縮両領域に位置する境界線の傾き E_0^P は、塑性仕事の増大に伴い減少するとしている。境界線の傾きを次式のような塑性仕事の関数で表している。

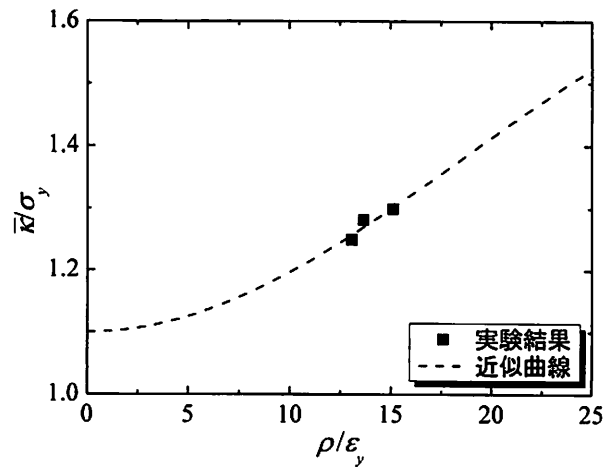


図-8 境界線半径と累積相当塑性ひずみの関係

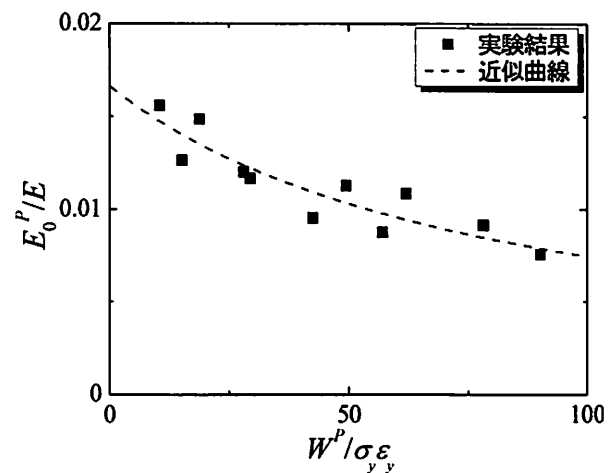


図-9 境界線の傾きと塑性仕事量の関係

$$\frac{E_0^P}{E} = \frac{E_{0i}^P/E}{1 + \omega \sigma_y \varepsilon_y (W^P/\sigma_y \varepsilon_y)} \quad (7)$$

ここで、 E_{0i}^P は初期の境界線の傾き、 ω は定数を表し、これらが材料パラメータである。ただし、 E_0^P は現経路における境界線の傾きであり、 W^P は現経路直前の折り返しまでの塑性仕事量である。

境界線の傾きを表すパラメータを求めるために必要となるのは、折り返しから境界線に達する曲線である。縦軸に E_0^P/E ，横軸に $W^P/\sigma_y \varepsilon_y$ をとり、実験4の結果をプロットした関係図を図-9に示す。同図には非線形最小2乗法によってパラメータ同定した場合の近似曲線もプロットしており、式(7)による境界線の傾きと塑性仕事量に関する相関性が伺える。

表-3 SD345 用材料パラメータ

内容	材料 パラメータ	SD345	SM490
累積相当塑性ひずみの増加に伴う弾性域の減少	a	-0.305	-0.528
	b	1.60	1.88
	c	24.9	18.7
	α	0.272	0.217
降伏棚の減少及び消失	M	-0.162	-0.522
形状パラメータ	e	4.26×10^2	3.16×10^2
	f/E	0.149	0.484
境界線半径	$\bar{\kappa}_0/\sigma_y$	1.10	1.13
	$\zeta \varepsilon_y^2$	1.52×10^{-3}	1.52×10^{-3}
境界線の傾き	E'_{0i}/E	1.66×10^{-2}	1.01×10^{-2}
	$\omega \sigma_y \varepsilon_y$	1.22×10^{-2}	6.93×10^{-3}

(5) 材料パラメータのまとめ

本研究より得られた、SD345 用修正 2 曲面の材料パラメータをまとめて表-3 に示す。なお、比較のため、Shen ら¹⁰⁾による SM490 鋼材の材料パラメータについても併せて示す。これらの材料パラメータを実験結果の予測に用いる場合には、それぞれの供試体の引張試験より得られる材料定数を乗除することで得られるようなまとめ方としている。表-3 によると、SD345 は SM490 と比較して、大きく傾向が変わることはないと言える。異なるところとしては、降伏棚の減少が、やや SM490 材に比べて、SD345 の方が緩やかな結果となっている点である。なお、そもそも降伏応力は SD345 と SM490 では異なることに注意されたい。本表ではあくまでも繰り返し特性に関するパラメータをまとめたものである。

4. 修正 2 曲面モデルによる予測解析

本節では、前節で示した材料パラメータを用いることで修正 2 曲面モデルによる予測解析の結果を示す。この予測は、実験時に与えたひずみ履歴を入力し、各ひずみ時における応力を出力したものである。

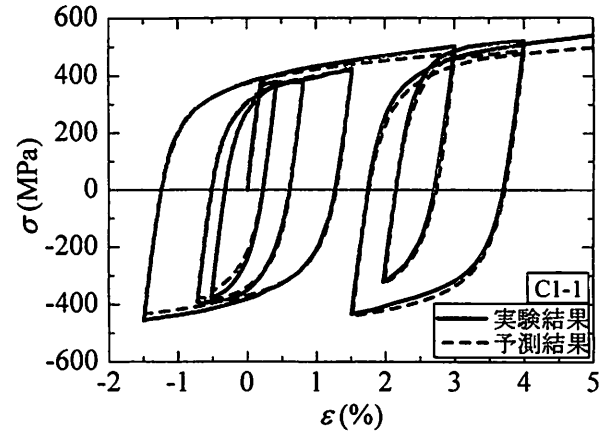


図-10 ランダム載荷実験の予測解析 (C1-1)

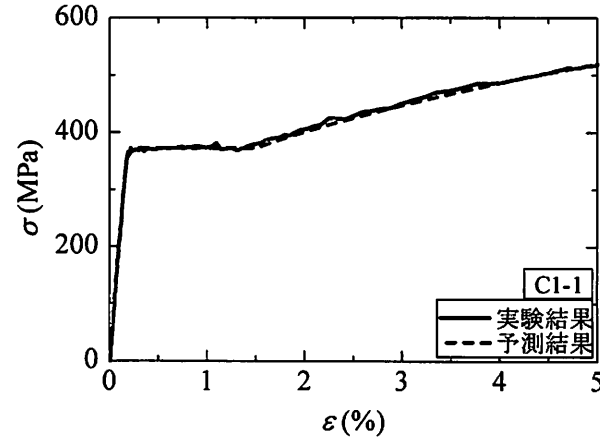


図-11 単調引張実験の予測解析 (C1-1)

(1) C1-1 の予測解析

ランダム載荷実験の予測結果を図-10 に示す。これより、全体的に解析の精度が高く、修正 2 曲面モデルにより鉄筋 (SD345) の繰り返し特性を表現できることが示された。また、単調引張実験の予測結果を図-11 に示す。

(2) C1-5 の予測解析

本研究では、C1-1 に対する実験によって材料パラメータの同定を行った。同じ SD345 であってもこの材料パラメータが大きく異なるようでは、そのパラメータを利用するには不便である。そこで、C1-5 については、単調載荷によって得られる材料パラメータと C1-1 から得られている繰り返し特性を表現する材料パラメータを利用して、ランダム載荷実験の予測を行うこととした。図-12 はその実験結果と予

測結果を比較した図である。同図によると、徐々に誤差が生じている状況ではあるが、おおむね予測できていると判断できる。なお、図-13には単調載荷時における精度も併せて検証した。境界線に関するパラメータは主に繰り返し特性から導き出されているため、図-11と比較すると、精度は落ちる。これらの誤差を比較するために、ランダム載荷時および単調引張載荷時のどちらにおいても、5%ひずみ時における応力の差を表-4にまとめた。C1-1における精度は高いものの、C1-5においても極端に精度が悪いことはないことが読み取れる。C1-5についても、繰り返し特性を表現するパラメータを同定するための実験を施してもよいが、表-3におけるSD345の材料パラメータが大きく変わることはないことは予想される。

5. 結論

本研究では鉄筋（SD345）の繰り返し特性の把握と、構成則として修正2曲面モデルの適用を目的に繰り返し載荷実験を行った。その結果から材料パラメータを決定し、そのパラメータを用いて修正2曲面モデルによる予測解析を実施した。予測解析の結果から、鉄筋（SD345）の材料特性という観点からは、繰り返し構成則として、修正2曲面モデルは適用可能であるといえる。そして、繰り返し特性を表現する材料パラメータを提案した（表-3）。これは、本研究ではロットの異なる試験体でもその精度を検証したため、表-3に記載のパラメータでおおむね繰り返し挙動を予測できると言える。

ただし、これらの成果は、あくまでも材料特性という観点からまとめている。コンクリート中に存在する鉄筋の繰り返し特性として、材料構成則に、例えば、付着の効果を考慮する必要があるれば、本成果を直接利用することは難しい。

なお、本論中に述べているが、境界線半径と累積相当ひずみの関係は、データの取得方法を含め、再検討することで、さらに精度が向上することに期待が持てる。

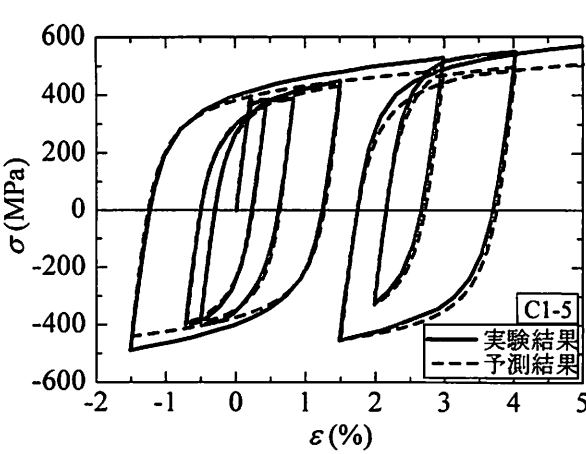


図-12 ランダム載荷実験の予測解析（C1-5）

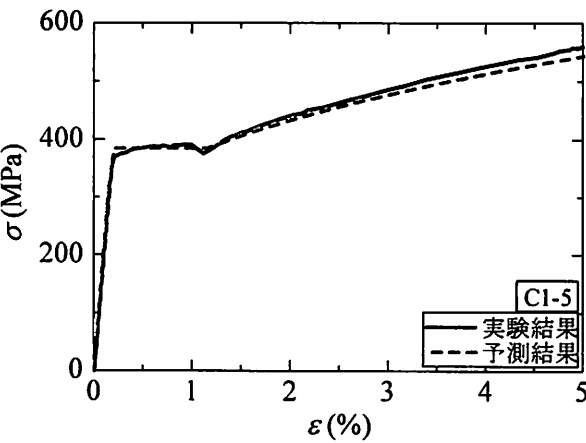


図-13 単調引張実験の予測解析（C1-5）

表-4 5%ひずみにおける実験結果と予測結果の比較

供試体	ランダム載荷実験	単調引張実験
C1-1	42MPa (7.8%)	-2MPa (0.4%)
C1-5	65MPa (11.3%)	16MPa (2.8%)

謝辞：本研究に用いた供試体は、独立行政法人防災科学技術研究所兵庫耐震工学センターで実施された実大 RC 橋脚の震動台実験で用いられたものを、あらかじめ材料試験用に製作いただいたものを用いている。ここに関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

1) 右近大道，梶原浩一，川島一彦，佐々木智大，運上茂樹，堺淳一，高橋良和，幸左賢二，矢部正明：E-Defenseを用いた実大 RC 橋脚（C1-1 橋脚）震動破壊実験研究

- 報告書，防災科学技術研究所研究資料 第 331 号，2009.1.
- 2) 右近大道，梶原浩一，川島一彦：E-Defense を用いた実大 RC 橋脚（C1-5 橋脚）震動破壊実験報告，第 12 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2009.1（掲載予定）.
- 3) Menegott, M. And Pinto, P.E.: Method of analysis for cyclically loaded R.C. plane frames including change in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending, IABSE Reports Vol.13, Lisbon, pp.15-22, 1973.
- 4) KATO, B.: Mechanical properties of steel under load cycles idealizing seismic action, Bulletin D'Information, No.131, CEB, IABSE-CEB Symposium, 1979.
- 5) 水野英二，沈赤，宇佐美勉：鋼素材に対する修正二曲面モデルの一般定式化，構造工学論文集，Vol.40A, pp.235-248, 1994.
- 6) 後藤芳顯，王慶雲，高橋宜男，小畑誠：繰り返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析と材料構成則，土木学会論文集，No.591/I-43, pp.189-206, 1998.4.
- 7) 西村宣男，小野潔，池内智行：単調載荷曲線をもとにした繰り返し塑性履歴を受ける鋼材の構成式，土木学会論文集，No.513/I-31, pp.27-38, 1995.
- 8) 田中良仁，水野英二，沈赤，宇佐美勉：降伏棚を有する鋼材の繰り返し弾塑性モデル—二曲面塑性モデルの開発—，構造工学論文集，Vol.37A, pp.1-14, 1991.
- 9) 皆川勝，西脇威夫，増田陳紀：塑性流れ域における構造用鋼の単軸繰り返し挙動の推定，構造工学論文集，Vol.35A, pp.53-65, 1989.
- 10) Shen, C., Mamaghani, I.H.P., Mizuno, E. and Usami, T.: Cyclic Behavior of Structural Steels. II: Theory, J. of Eng. Mech., ASCE, Vol.121, No.11, pp.1165-1172, 1995.