

異形棒鋼（SD345）の繰返し弾塑性挙動に関する実験

葛西昭¹・伊藤公二²・細井章浩²・稲垣冨城²

¹正会員 名古屋大学講師（〒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ている^{1)~4)}。この実験の成果は、RC製橋脚の耐震性能に関する基礎データとして、細部に亘ってデータを網羅しておくことは重要である。そこで、この実験に用いられた異形棒鋼（SD345）の材料特性について、基礎的な繰返し弾塑性状態や動的応答特性に及ぶ部分までの検証を行った。本論文は、その検証結果をまとめるものである。なお、RC構造物中の鉄筋について、その動的外力下での応答は、既往の研究⁵⁾において報告されているが、その成果も踏まえつつ、まとめていくこととする。

本研究では、RC製橋脚の実大震動台実験^{1)~4)}にて準備されたCI-1、CI-2、CI-5における主鉄筋および帯鉄筋として用いられた鉄筋（SD345）の材料特性を把握するための静的載荷実験を行い、CI-5主鉄筋に関しては名古屋大学で開発された修正2曲面モデル⁶⁾を弾塑性履歴モデルとして適用し、既往の研究³⁾において同定されたSD345のパラメータを用いて解析を行い、結果の比較検討を行った。

なお、著者らはCI-1の主鉄筋（CI-1-D29-ロット1）⁴⁾とCI-2の主鉄筋（CI-2-D29-ロット1）³⁾について、既にその材料特性について報告している。本論文では、それらの成果も列記し、総括する。また、動的外力下での鉄筋の応答特性を解明するためにCI-5主鉄筋の動的載荷実験を行い、静的載荷実験結果および解析結果との比較検討を行った。

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、既に一定の成果が報告されているが、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

表-1 鉄筋テストピース一覧

用途		供試体	加工ネジ
主鉄筋	CI-1	CI-1-D29-ロット1	M24
	CI-5	CI-5-D35-ロット1	M24
	CI-2	CI-2-D29-ロット1	M24
		CI-2-D29-ロット2	M24
		CI-2-D29-ロット3	M24
帯鉄筋	CI-5	CI-5-D22-ロット1	M18
	CI-2	CI-2-D13-ロット1	M10
		CI-2-D13-ロット2	M10

い。

2. 静的実験

CI-1、CI-2、CI-5において主鉄筋および帯鉄筋として用いられた鉄筋（SD345）それぞれの材料特性を把握するための静的実験を行った。

(1) 実験概要

静的実験の概要を以下に示す。

a) 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に加工したものとする。

CI-1、CI-2、CI-5に用いられた鉄筋はすべて同一鋼種（SD345）であるが、ロットが異なるため、それぞれにおいて若干の材料特性の差異が考えられるため、ロット毎に静的実験を行った。表-1に各供試体とそれぞれの用途の一覧を示す。供試体名は、対象震動台実験試験体名のあとに径を示す数字、および、製作ロットの違いを数字

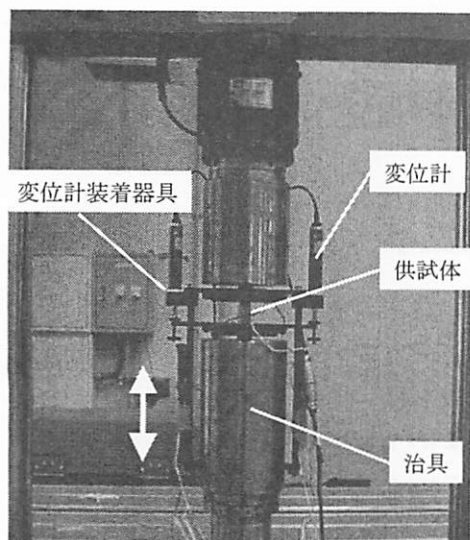


図-1 実験装置概要

表-2 主鉄筋の材料定数

用途	供試体	E (GPa)	σ_y (MPa)	ε_y (%)	E_{st}^P (GPa)	ε_{st}^P (%)	σ_u (MPa)	ν
C1-1	C1-1-D29-ロット1	202	375	0.186	5.99	1.350	671	0.30
C1-5	C1-5-D35-ロット1	203	357	0.176	7.72	0.737	693	0.28
C1-2	C1-2-D29-ロット1	200	386	0.194	7.13	0.981	698	0.29
	C1-2-D29-ロット2	218	379	0.174	6.95	1.095	683	0.30
	C1-2-D29-ロット3	197	394	0.200	6.43	1.210	700	0.30

表-3 帯鉄筋の材料定数

用途	供試体	E (GPa)	σ_y (MPa)	ε_y (%)	E_{st}^P (GPa)	ε_{st}^P (%)	σ_u (MPa)	ν
C1-5	C1-5-D22-ロット1	233	397	0.170	3.52	1.202	696	0.27
C1-2	C1-2-D13-ロット1	211	407	0.196	4.56	1.545	650	0.28
	C1-2-D13-ロット2	201	419	0.210	5.70	1.373	717	0.29

にて示している。

b) 実験装置

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

測定データは、供試体に荷重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 つ取り付け測定した。データの計測には、東京測器研究所製 TDS-302 を用いた。実験装置の概要を図-1 に示す。

c) 実験方法

すべての供試体に対し、材料定数を決定するための単調引張荷重実験を行い、C1-1-D29-ロット 1、C1-5-D35-ロット 1、C1-2-D29-ロット 1 に関しては、繰返し特性を求めるためのランダム荷重による繰返し荷重実験を行った。データ計測にあたって、十分なホールド時間を設けて、力の釣り合いがとれている状態で計測する必要があるが、本研究では、荷重荷重をホールドし計測を行う際に、45 秒間のホールドタイムを設定した。

また、バウシinger 効果を表現できる繰返し弾塑性

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⁴⁾の解析精度の検証を目的として、ランダム荷重による繰返し荷重実験を実施した鉄筋それぞれの予測解析を行った。

(2) 実験結果

a) 主鉄筋

主鉄筋に対する単調引張実験より得た材料定数を表-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。これらは各供試体それぞれ 2 体の引張実験の結果から平均をとったものである。

それぞれの鉄筋を比較すると降伏応力で最大 10.3%、引張強度で最大 4.3%の相対誤差があることがわかる。

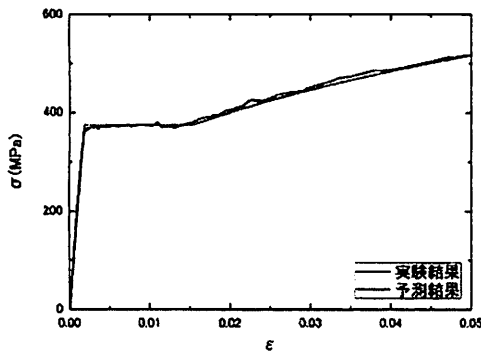


図-2 単調引張実験の解析 (CI-1-D29-ロット1)

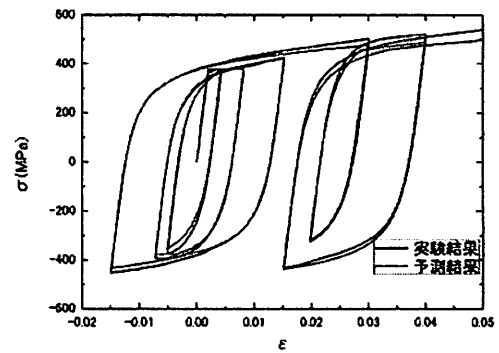


図-3 ランダム載荷実験の解析 (CI-1-D29-ロット1)

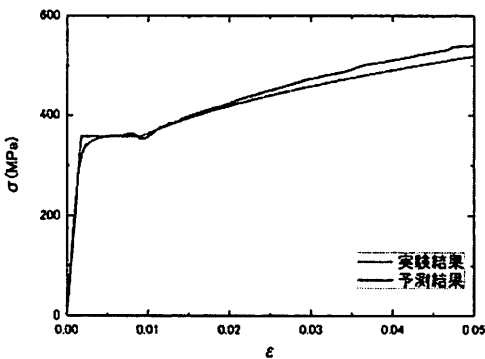


図-4 単調引張実験の解析 (CI-5-D35-ロット1)

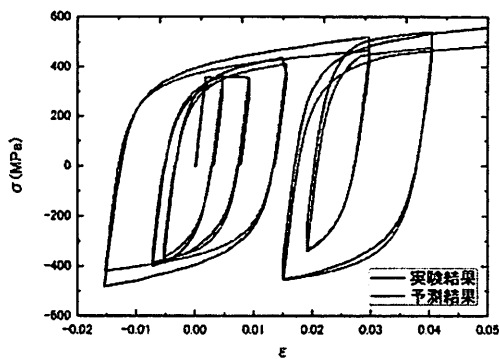


図-5 ランダム載荷実験の解析 (CI-5-D35-ロット1)

b) 帯鉄筋

それぞれの橋脚に用いられた帯鉄筋に対する単調引張実験より得られた材料定数を表-3に示す。これらも主鉄筋の場合と同様に、各供試体それぞれ2体の引張実験の結果から平均をとったものである。

帯鉄筋の材料定数の特徴として、主鉄筋に比べ降伏応力が大きい傾向がある。また帯鉄筋同士で比較した場合、降伏応力で最大5.7%、引張強度で最大10.3%の相対誤差があり、主鉄筋も含めた相対誤差の最大値は、降伏応力で17.4%、引張強度で10.3%であり、ロットの違いによる材料定数の違いが顕著に表れている。

c) 解析結果との比較

修正2曲面モデルの解析精度の検証を目的として、主鉄筋に対する予測解析を行った。この予測解析は、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。修正2曲面モデルで繰り返し特性を表現する材料パラメータについては、既往の研究³⁾によって得られたCI-1-D29-ロット1のものを、単調引張載荷実験により得られる材料定数については各鉄筋それぞれのものをを用いた。

まず修正2曲面の精度を確かめるため、CI-1-D29-ロッ

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
CI-1-D29- ロット1	42MPa(7.8%)	-2MPa(0.4%)
CI-2-D29- ロット1	65MPa(11.3%)	16MPa(2.8%)
CI-5-D35- ロット1	74MPa(15.2%)	27MPa(5.3%)

ト1の単調引張実験の結果と予測結果との比較を図-2に示し、ランダム載荷実験の結果と予測結果との比較を図-3に示す。これらより、CI-1-D29-ロット1に関しては予測の精度が高く、修正2曲面モデルにより鉄筋(SD345)の繰り返し特性を十分に表現できることが確認できた。

つづいて、CI-5-D35-ロット1の単調引張載荷実験によって得られた材料パラメータと既往の研究³⁾で同定されたCI-1-D29-ロット1の繰り返し特性を表現する材料パラメータを利用し、CI-5-D35-ロット1の単調引張載荷実験

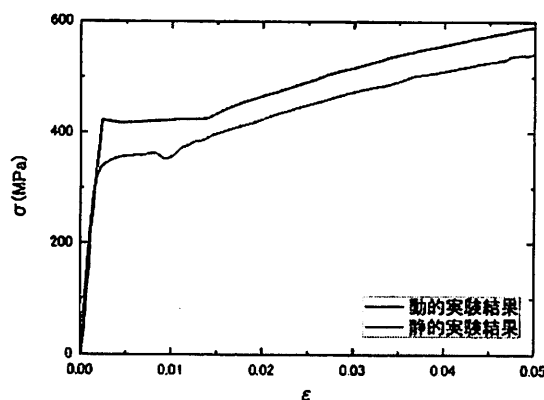


図-6 単調引張荷重の応力-ひずみ関係（動的と静的）

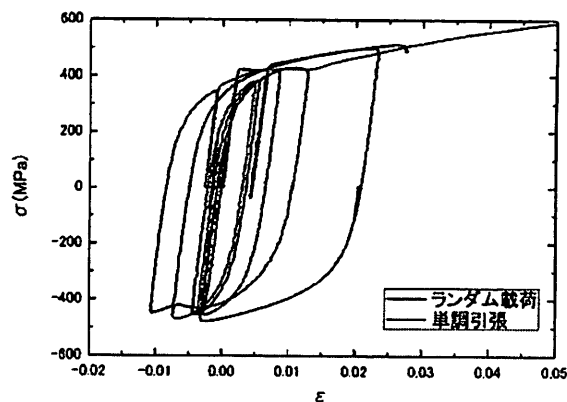


図-7 単調引張荷重とランダム載荷での応力-ひずみ関係

およびランダム載荷実験の予測解析を行った。

図-4 は単調引張荷重の実験結果とその予測解析の結果を比較したもので、図-5 はランダム載荷の実験結果とその予測解析の結果を比較したものである。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-2、3 と比較すると図-4、5 ではどちらの載荷パターンにおいても塑性が進行すると相対誤差量が増大しており、精度は落ちている。そこで、これらの誤差を比較するため表-4 に既往の研究³⁾で行われたC1-2-D29-ロット1の結果も含めて5%ひずみ時における応力の差を、単調引張載荷時およびランダム載荷時どちらのケースもまとめた。繰り返し特性を表現する材料パラメータを同定し、解析を行ったC1-1-D29-ロット1における精度が高く、他の2 ケースにおいても若干誤差が大きい単調引張載荷試験においてもロットの違いによる誤差が確認されているため、解析精度が極端に悪いことはないということが読み取れる。また予測解析結果は、実験結果に比べて応力が小さく予測される傾向が読み取れる。

3. 動的実験

実際の地震動は構造物に対して動的外力としてはたつき、外力の載荷速度の変化が鉄筋の動的応答に与える影響を把握することは RC 構造物の耐震設計を行う上できわめて重要であると考えられる。以下は動的繰り返し外力に対する鉄筋の応答特性について把握することを目的に、今後の研究の展望として試験的に行った動的実験について、その概要を以下に示す。

(1) 実験概要

動的実験は静的実験と同様の疲労実験器、変位計装着器具、変位計、ひずみゲージを用いた。データの計測に

は、東京測器研究所製 TMR-211 を用い、サンプリング周波数は20Hzとした。供試体はC1-5-D35-ロット1を用いた。載荷パターンとして、単調引張載荷実験、ランダム載荷による繰り返し実験および変位量 $\pm 3\text{mm}$ の定振幅載荷実験を行った。荷重の制御方法としては、静的実験における変位計の値を用いたひずみ制御とは異なり、治具のストロークの値によって制御した。単調引張載荷実験においては10mm/秒、ランダム載荷実験では0.1~4.4mm/秒、定振幅載荷実験では1mm/秒の載荷速度で載荷した。また、ランダム載荷実験については、予測解析結果との比較検討も行う。

(2) 単調引張載荷実験

単調引張載荷の静的実験結果と動的実験結果を図-6 に示す。同図から、降伏応力で64MPa (18%)、5%ひずみ時における応力で45 MPa (8%) ほど動的実験における応力が静的実験における応力を上回っていることが読み取れる。これは、静的実験がデータ計測時に一旦載荷を停止し、つり合い状態としてからデータを計測しているのに対して、動的実験においてはデータ計測時に載荷を続けているために、つり合い状態ではなく運動している状態でデータ計測を行っている。そのため同じひずみ量においても応力が大きくなるのだと考えられる。また、この結果は睦好ら⁹⁾の実験結果と同様の傾向である。

(3) ランダム載荷実験

単調引張載荷実験の結果は予期された範疇であったため、つづいて繰り返し特性を把握するためにランダム載荷実験を行い、単調引張載荷実験との比較検討、静的実験との比較検討および予測解析の精度の照査を行った。

a) 静的実験との比較

ランダム載荷および単調載荷の応力-ひずみ関係を図-7

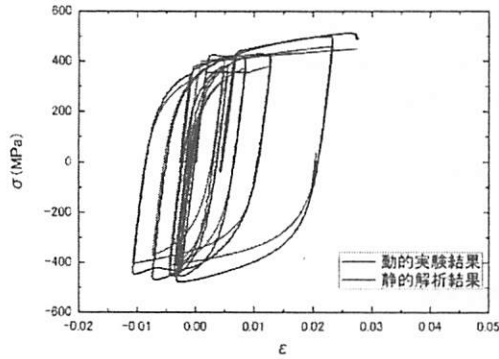


図-8 ランダム荷の応力-ひずみ関係
(動的と予測解析)

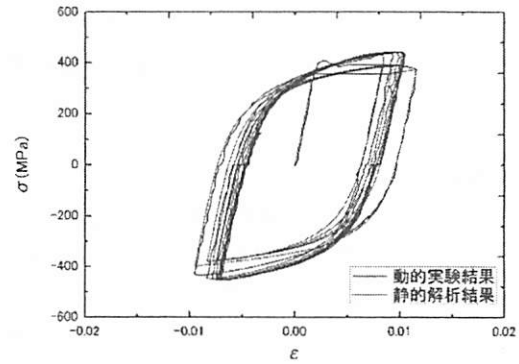


図-9 定振幅荷の応力-ひずみ関係
(動的と予測解析)

に示す。図-5 に示す静的実験におけるランダム荷の応力-ひずみ関係と比較すると、ひずみが比較的小さな領域においては、単調引張荷重実験と同様に動的実験における応力が静的実験における応力を上回っており、降伏応力で比較すると動的実験より得られた降伏応力の方が 65MPa (18%) 大きい。しかしながら、引張荷重時の 1.5% ひずみ時における応力の差は 4 MPa (1%) であり、ひずみが大きな領域においては境界線がほぼ重なっている。

b) 単調引張荷重実験との比較

図-7 から、単調引張荷重における棚終り付近までは、ほぼ同様の履歴を示している、降伏応力の差も 3MPa (0.8%) と小さいことがわかる。ランダム荷重における 1 サイクル目の荷重速度が 0.9 mm/秒であり、単調引張荷重における荷重速度が 10mm/秒であることから、その程度の荷重速度の違いによっては、棚終り付近までは履歴に大きな差異は生じないということがわかる。これらの結果も陸好ら⁵⁾の実験結果と同様の傾向である。

c) 解析結果との比較

予測解析結果と動的実験結果を図-8 に示す。動的実験における応力が予測解析における応力を上回っており、降伏応力で 68MPa (19%) 大きく、サイクルの折り返し地点で比べた場合、引張側での最大相対誤差は 19% であり、圧縮側での最大相対誤差は 20% であった。なお、ランダム荷重実験においては、荷重速度がサイクルによって異なっていたため、予測解析結果との単純な比較はむづかしく、そのため荷重速度の影響を勘案するためには、荷重速度をパラメータとして一定に保った動的実験を行う必要がある。

(4) 定振幅荷重実験

ランダム荷重実験においてひずみの大きさによって静的実験と同等の履歴となる箇所と不一致な箇所があったため、動的な繰返し外力下での鉄筋の応答特性をより正確に把握することを目的として、定振幅荷重実験を行

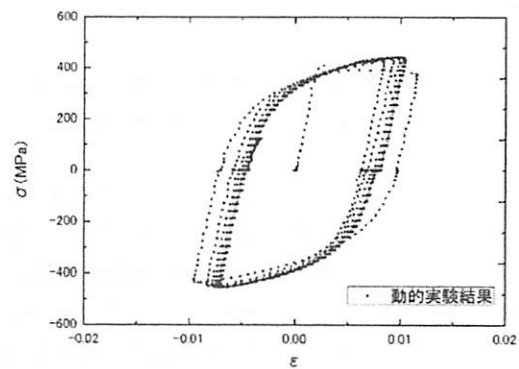


図-10 定振幅荷の応力-ひずみ関係

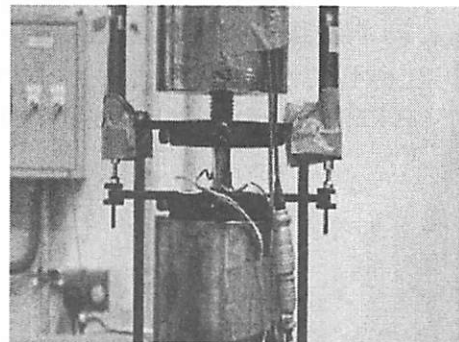


図-11 圧縮荷前

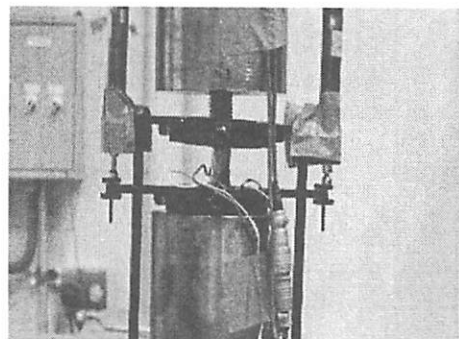


図-12 圧縮荷後

った。図-9 に動的実験結果と静的解析結果の応力-ひずみ関係を示す。解析結果に誤差が含まれているため、正確な比較は困難であるが、境界線の傾きが動的実験結果の方が急勾配である。

(5) 問題点

図-10 に定振幅载荷による動的実験より得られた応力-ひずみ関係を示す。同図における応力ゼロ付近において、応力は変動せずにひずみのみ変動している。この原因として、図-11 と図-12 を比較してわかるように、圧縮時において変位を制御する治具の芯がずれていることがあげられる。

4. 結論

本研究では、RC 製橋脚の実大振動台実験の供試体 C1-1、C1-2 および C1-5 において使用された鉄筋 (SD345) のロット毎の材料定数を把握することを目的として、単調引張载荷実験を実施した。その実験より得られた結果が表-2、3 である。また主鉄筋に関しては、繰返し特性の把握のためのランダム载荷実験を行い、単調引張载荷実験より得られた結果と併せて、予測解析を行い、その妥当性を証明した。そして、現在進行中の動的载荷実験の途中経過として、静的载荷実験との比較検討を行い、ひずみが小さな領域で差異があることを確認した。

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。

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、あらかじめ材料実験用に製作いただいたものを用いた。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.
- 3) 葛西昭, 稲垣牙城: 実大 RC 橋脚コンポーネント振動台実験に用いられた鉄筋の繰返し弾塑性挙動, 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.
- 4) 稲垣牙城, 杉浦隆明, 葛西昭: 異形鋼棒 (SD345) の繰返し弾塑性構成則に関する実験的研究, 平成 19 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, I-13, pp.25-26, 2008.3
- 5) 睦好宏史, 町田篤彦: 動的外力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究, 土木学会論文集, 第 345 号/V-2, pp.81-90, 1985.2.
- 6) 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.