

高性能鋼材の塑性履歴特性と構成式

Characteristics of plastic hysteresis of high performance steels and there constitutive equations

宮寄 靖大*, 奈良 敬**, 小野 潔***, 三好 崇夫****, 森 省吾*****

Yasuhiro MIYAZAKI, Satoshi NARA, Kiyoshi ONO, Takao MIYOSHI, Shougo MORI

*工修, 後期課程, 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

**工博, 教授, 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

***博士 (工学), 助教授, 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

****博士 (工学), 特任助手, 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

*****前期課程, 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

High performance material is significant for improvement in safety, economy and life of structures, as compared with current ones. This paper focuses high tensile strength and corrosion resistance on high performance steels as the ultra steel and stainless steels, which are SUS304 and SUS304N2, respectively. At first, stress-strain relations of the materials are clarified by means of a coupon test. Secondly, constitutive equations and their parameters are proposed, and applicability of the equations is demonstrated. Finally, proposed constitutive equations and parameters are shown to be adequate for the high performance steels as well as mild steel.

Key Words : ultra steel, SUS304, SUS304N2, constitutive equation

キーワード: 超鉄鋼, SUS304, SUS304N2, 構成式

1. まえがき

高度経済成長期に建設された我が国の構造物が 2010 年頃を境に一斉に更新期を迎え始める。このような構造物に対して、従来に比べて優れた性能を持つ材料を活用し、補修や補強等による延命化処置や再構築を施すことで、安全性や経済性の向上した構造物の構築が可能となる。優れた特性を持つ鋼材としては、これまでに数多くの橋梁に使用されている耐候性鋼や高張力鋼などの高性能鋼材が挙げられる。

既に建築分野では、高い耐食性と高延性・高靱性などの特徴を有するステンレス鋼に関する設計基準¹⁾が設けられており、建築構造物の主部材として使用されている。厳しい自然環境下に曝される土木構造物においても、優れた耐食性を持つ材料を使用することでライフサイクルコストの低減が期待される。このような背景から、ステンレス鋼を橋梁へ利用するための研究も進められるようになってきた^{2),3)}。

高強度鋼材を橋梁部材に活用することで、部材が軽量化され、適度に長周期化することにより地震時等の安全性の向上が期待できる。さらに、部材のコンパクト化に

より設計の自由度が拡大され、経済的にも優れた構造物の設計が可能となる。しかし、高強度鋼は普通鋼に比べて延性や靱性が劣るため、地震時の損傷を抑制する必要がある。使用箇所を明確にすると共に適切なエネルギー吸収が行える部材を取り入れる必要がある。

以上のような高性能鋼材を構造物へ取り入れるためには、素材レベルでの機械的性質や構造部材としての耐荷力特性の評価式を設計基準類に導入することが必然である。また、地震などの繰り返し荷重を受ける場合には、基本となる材料特性を明確にしておかなければならない。そこで本研究では、高性能鋼材として、高い耐食性を持つオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304, SUS304N2) と高強度・高耐食性を兼ね揃えた超鉄鋼 (J 材, ST 材) に着目し、各鋼材の応力ひずみ関係を材料試験により明らかにすることとする。また、これらの材料を使用した構造物が、地震荷重のような不規則な繰り返し荷重を受けた場合の挙動を数値計算により照査する際に必要となる構成式について、ステンレス鋼および超鉄鋼への普通鋼に用いられる構成式^{4),5)}の適用性を確認することとする。

2. 鋼材の材料特性

本研究では、超鉄鋼とステンレス鋼の塑性履歴特性を明確にするとともに、これらの鋼材に対して普通鋼に用いられる既往の構成式の適用性を照査する。対象とする鋼材は、降伏比が約 92% の J 材、約 98% の ST 材の超鉄鋼 2 種類と SUS304, SUS304N2 のオーステナイト系ステンレス鋼 2 種類の合計 4 鋼種とする。超鉄鋼は、開発段階の鋼材であり、試作段階での材料を本研究に利用したため、化学成分や粒径などの詳細な材料データは照査していない。また、いずれの鋼種においても微視的な集合組織等の測定は実施していない。

それぞれの鋼種に対して、繰り返し荷重を受ける場合の塑性履歴特性を照査するため、①単調荷重試験、②弾性域の減少を照査するための繰り返し荷重試験、③両振り繰り返し荷重試験の 3 種類の試験を実施する。本研究は、土木構造物への高性能鋼材活用に向けた基本的な材料特性を調べるため、静的な荷重としてひずみ速度 1%/min 程度で実施する。

2.1 試験片

材料試験に用いた試験片を図-1 に示す。

SUS304, SUS304N2 の供試体は、1000mm×1000mm、板厚 20mm の正方形板から、圧延方向(RD)、圧延直角方向(TD)にて採取した。試験片の形状は、超鉄鋼、ステンレス鋼共に全長が 154mm、つかみ部の外径が 22mm、平行部の外径が 10mm、平行部の長さが 20mm である。材料試験に用いた供試体数は、超鉄鋼 J 材-6 体、ST 材-5 体、SUS304-23 体(RD14 体、TD9 体)、SUS304N2-19 体(RD8 体、TD11 体)である。ひずみの検出は、平行部中央において 180 度の間隔で 2 枚貼り付けたひずみゲージと平行部に取り付けた伸び計により行う。ひずみゲージは、超鉄鋼が FLA-5 (東京測器製)、ステンレス鋼は FLA-3 (東京測器製) を用いて測定する。

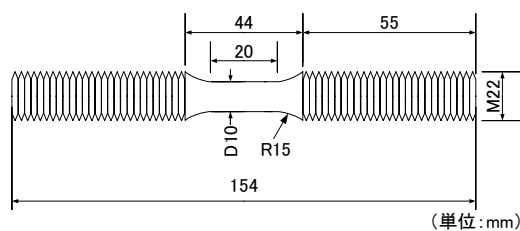


図-1 材料供試体

2.2 単調荷重試験

図-2 から図-4 にステンレス鋼と超鉄鋼の単調荷重試験結果を示す。SUS304 と SUS304N2 の結果に着目してみると、試験体の採取方向の違いによる結果は大きくないことがわかる。これより、本研究では RD と TD による異方性はないと仮定する。

図-4 の超鉄鋼材料に着目してみると、J 材が ST 材に比べてやや大きな応力を示すことが読み取れる。また、J 材、ST 材共に塑性化後、わずかなひずみ硬化の発生が

見られる。

2.3 弾性域の減少を照査するための繰り返し荷重試験

鋼材が繰り返し荷重を受けた場合、ある程度の大きさのひずみを受けた後、弾性域の大きさは一定値に収まる⁴⁾ことが報告されている。その値を特定するため、わずかなひずみステップでの繰り返し荷重を作用させた試験を実施する。

図-5 と図-6、図-7 に SUS304 と SUS304N2、超鉄鋼の試験結果を示す。図-5 と図-6 に着目してみると、RD と TD の結果にはほとんど差がないことがわかる。これより、繰り返し荷重が作用した場合にも、SUS304 および SUS304N2 についての異方性はないと仮定する。SUS304 と SUS304N2 の結果を比較してみると、全体的に SUS304N2 の応力が SUS304 よりも 170MPa 程度大きくなっているものの履歴形状については、類似していることがわかる。

図-7 に示す超鉄鋼については、J 材に比べて ST 材の方がやや高めの応力を示していることがわかる。形状は、ST 材、J 材ともによく似ていることがわかる。

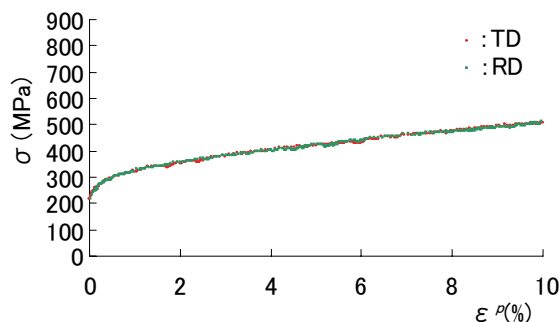


図-2 SUS304

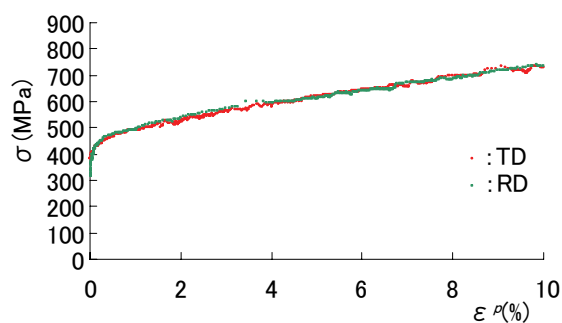


図-3 SUS304N2

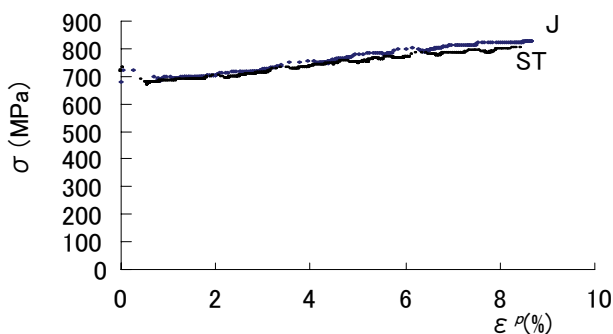


図-4 超鉄鋼

2.4 両振り繰り返し载荷試験

図-8, 図-9 に SUS304 および SUS304N2 と超鉄鋼の両振り繰り返し载荷試験結果を示す。SUS304 および SUS304N2 は、試験結果から RD と TD による差が小さいことがわかる。SUS304, SUS304N2 共に、ひずみの増大とともに履歴ループが大きくなっていることが読み取れる。

図-10 に示す超鉄鋼 J 材と ST 材の結果を比較してみると、両鋼材の結果にはほとんど差が見られない。このことから、降伏比を変化させた超鉄鋼 J 材, ST 材の強度の変化は、単調载荷時には多少見られるが、両振り繰り返し荷重を受ける場合にはその差がほとんど発生しないことが明らかとなった。また、図-10 では、比例限を越えた後、部分的に応力が突出し、その後の除荷開始点に至るまで応力が減少していることが分かる。これは、上降伏点が発生した結果であり、これ以降の繰り返し履歴を見ると応力は繰り返し回数と共に上昇しているため、

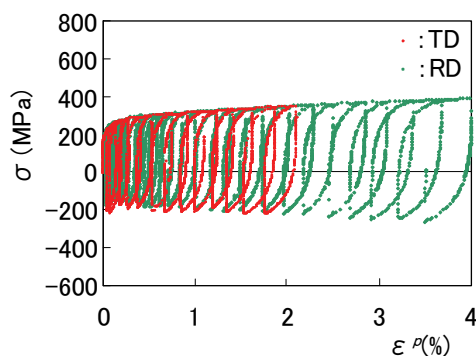


図-5 SUS304

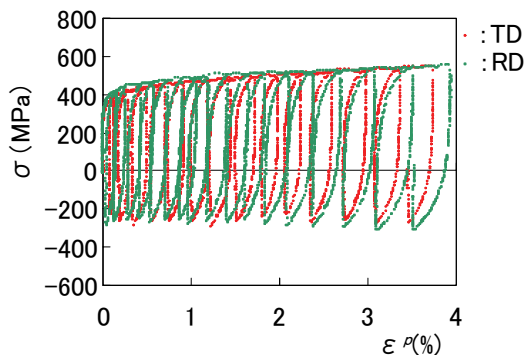


図-6 SUS304N2

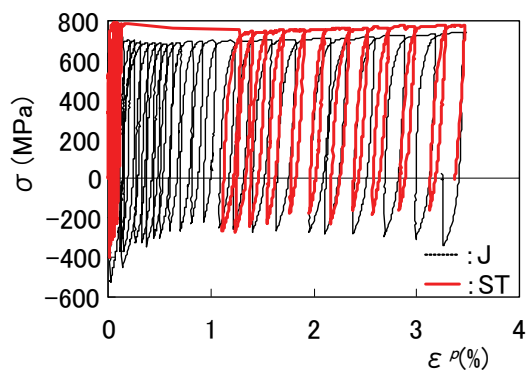


図-7 超鉄鋼

軟化現象ではないことが確認できる。

図-11 は、SUS304, SUS304N2 および超鉄鋼の両振り繰り返し载荷試験により得られた結果を基に、応力上昇率と塑性ひずみとの関係を示している。縦軸の応力上昇率は、引張側の除荷開始時の応力を初期の除荷開始時の応力で無次元化した値である。同図から、対象としたすべての鋼材は、繰り返しとともに応力が上昇することがわかる。超鉄鋼に着目してみると、ST 材が J 材に比べてわずかながら上昇率が大きいことが読み取れる。本来 J 材が ST 材に比べて降伏比が小さいため、塑性化後の応力の上昇が大きくなると予測されるが、試験結果は

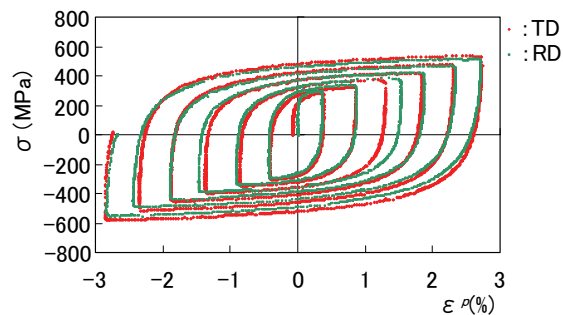


図-8 SUS304

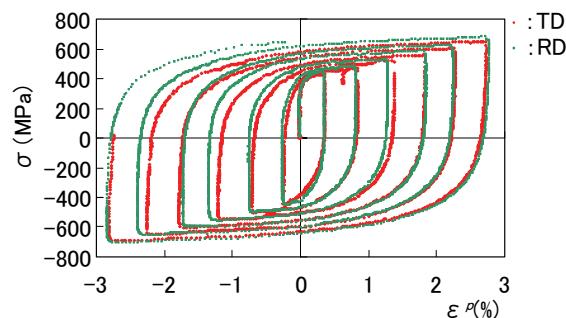


図-9 SUS304N2

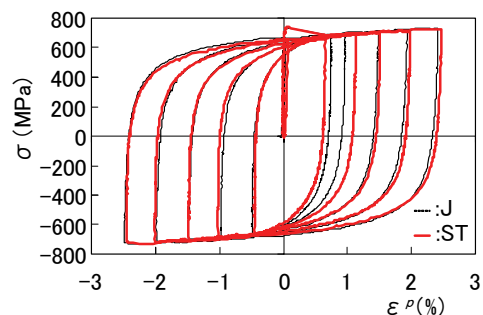


図-10 超鉄鋼

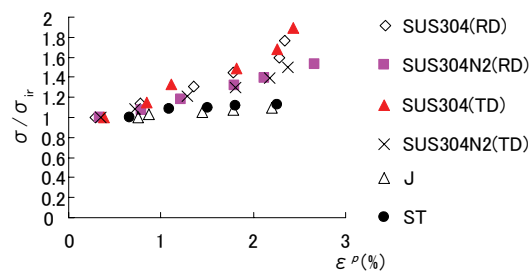


図-11 応力上昇率

ST 材の方が大きくなった．これについては，開発途中の試作品を今回の試験に用いているため，今後完成した超鉄鋼を用いて試験を実施する必要がある．

SUS304 と SUS304N2 の応力上昇率は，塑性ひずみ 2.5% 付近で約 1.8 と約 1.5 であり，超鉄鋼に比べて大きいことがわかる．

3. 材料構成式

本研究で扱う構成式は，図-12 に示すような単調載荷曲線に基づいた真応力 σ と塑性ひずみ ε^p の関係で表現したものである．そこで，材料試験から得られる公称ひずみ ε_N と荷重 P のデータを次式により変換する．

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{P(1+\varepsilon_N)}{A} \\ \varepsilon &= \ln(1+\varepsilon_N) \\ \varepsilon^p &= \varepsilon - \varepsilon^e = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで，

ε : 真ひずみ

ε^e : 弾性ひずみ

A : 試験片の平行部の断面積

E : ヤング率

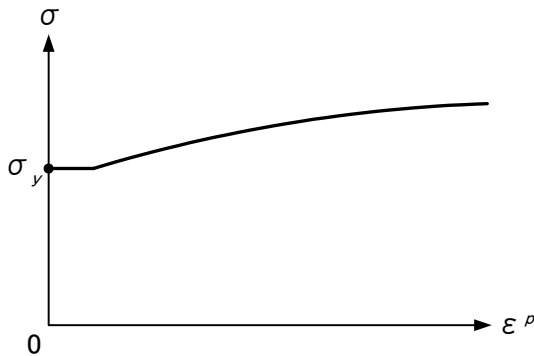


図-12 単調載荷曲線

図-13 に示す繰り返し載荷経路は，単調載荷曲線に準ずる領域，線形遷移領域，非線形遷移領域の 3 つの領域に分割し，各領域に対する構成式により表現できる．以下に，各領域における構成式について述べる．

3.1 単調載荷曲線に準ずる領域

単調載荷曲線に準ずる領域の構成式は，ひずみ硬化領域での塑性接線係数の変化を注意し，ひずみ硬化開始点において $\sigma = \sigma_y$, $d\sigma/d\varepsilon_{mon}^{p*} = E_{st}^p$ を満たす次式により表現する．

$$\sigma = \frac{E_{st}^p}{b} \exp(a\varepsilon_{mon}^{p*}) \ln(1+b\varepsilon_{mon}^{p*}) + \sigma_y \quad (a \geq 0) \quad (2)$$

ここで，

ε_{mon}^{p*} : ひずみ硬化開始点を原点としたときの単調載荷曲線上の塑性ひずみ

E_{st}^p : ひずみ硬化勾配

σ_y : 降伏応力

a, b : 鋼材によって決まる定数

周知のように SUS304, SUS304N2 は，明確な降伏棚と降伏点が現れない．そのため，図-14 に示すような単調載荷曲線を用い，降伏応力 σ_y は弾性限に対する応力として取り扱うこととした．材料試験による弾性限の特定は困難であるとともにその定義が明らかでないため，本

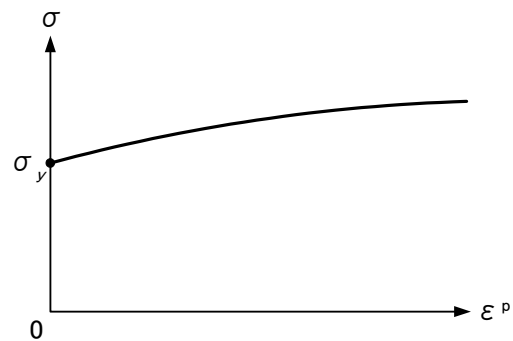


図-14 単調載荷曲線 (SUS304, SUS304N2)

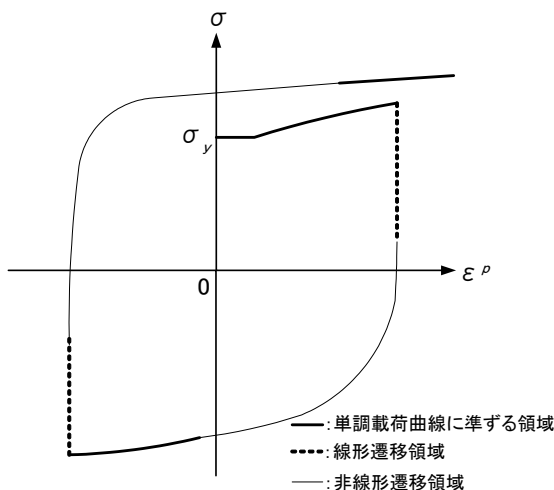


図-13 繰り返し載荷経路

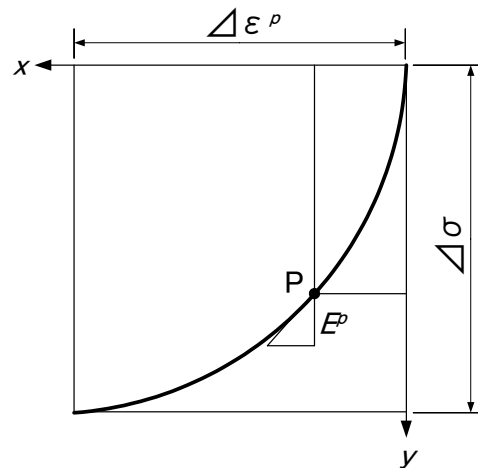


図-15 非線形遷移領域

研究では、1つの目安として塑性ひずみが約0.01%発生する点を弾性限と仮定する。また、ひずみ硬化はこの点から開始すると仮定する。

3.2 線形遷移領域

鋼材は、ある程度の繰り返し荷重を受けた後の弾性域の大きさは、一定値に収まることが明らかにされている⁴⁾。本研究では、線形遷移領域をより簡素化して表現することとし、弾性域の大きさは常に一定として次式を採用する。

$$\frac{\kappa}{\kappa_0} = c \quad (3)$$

ここで、

κ : 弾性域の大きさ

κ_0 : 初期の弾性域の大きさ(=2 σ_y)

c : 鋼材によって決まる定数

3.3 非線形遷移領域

図-13 に示した第2, 第4象限に位置する非線形遷移領域のみを取り出したものを図-15 に示す。同図を基にして、非線形遷移領域についての構成式は以下に示す3つの式で表現する。

$$y = E_0^p x + (\Delta \varepsilon^p E_0^p - \Delta \sigma) \left(\frac{x}{\Delta \varepsilon^p} \right)^{m+1} \left\{ (1+m) \ln \left(\frac{x}{\Delta \varepsilon^p} \right) - 1 \right\} \quad (3)$$

$$\Delta \varepsilon^p = \frac{e}{d} \sqrt{(\varepsilon_{mon}^p)^2 + 2d\varepsilon_{mon}^p} \quad (4)$$

ここで、

$\Delta \varepsilon^p$: 非線形遷移領域の塑性ひずみの大きさ

$\Delta \sigma$: 非線形遷移領域の真応力の大きさ

E_0^p : 非線形遷移領域終了点の塑性接線係数

m : 非線形遷移領域の形状を表すパラメータ
($-1 < m < 0$)

ε_{mon}^p : 単調載荷曲線上の塑性ひずみ(%)

d, e : 鋼材によって決まる定数

$$m = \frac{f}{\varepsilon_{mon}^{p*} + \{1 + \exp(g)\}f} - 1 \quad (5)$$

ここで、

f, g : 鋼材によって決まる定数

以上の各領域に対する構成式に含まれる材料定数を試験結果との回帰計算により決定する。

4. 構成式に含まれる材料定数

ここでは、2. の載荷試験により得られた結果を用いて、3. で述べた構成式中に含まれる鋼材によって決まる定数を回帰計算により決定し、それらの値を代入した構成式による数値シミュレーションが試験結果を的確に

表-1 単調載荷曲線に準ずる領域

	SUS304	SUS304N2	超鉄鋼	
			J	ST
σ_y (MPa)	222	301	693	667
E_{st}^p (MPa)	18700	37500	2290	3970
ε_{st}^p	0	0	0.0120	0.00709
a	2.50	3.43	1.39×10^{-5}	6.19
b	295	501	6.13	147

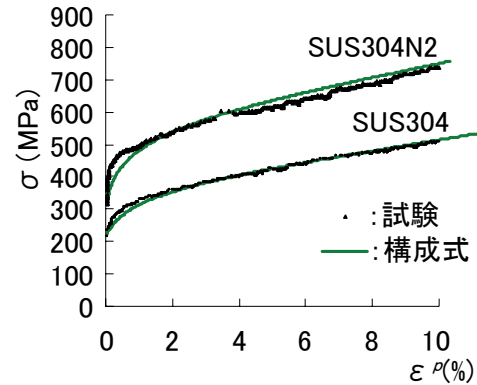


図-16 ステンレス鋼

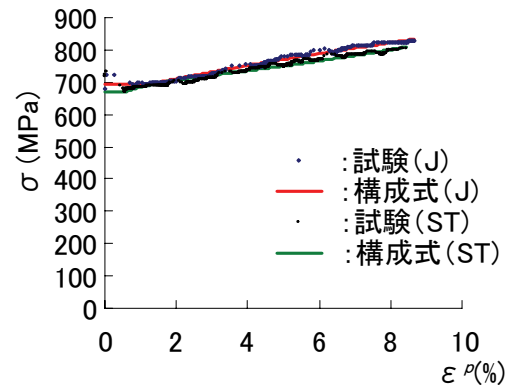


図-17 超鉄鋼

表現できるかを検証する。SUS304 および SUS304N2 について求める材料定数は、異方性はないと仮定し、RD と TD の結果を平均した値とする。

4.1 単調載荷曲線に準ずる領域

2.2 で得られた単調載荷試験結果と式(2)を用いて回帰計算を行い、鋼材に関する材料定数を決定する。図-16 と図-17 に、試験結果と構成式による数値シミュレーション結果を点と実線で示す。図-16 に示すステンレス鋼は、明確な降伏点と降伏棚を持たないことから、降伏点を弾性限に取り、降伏棚を常にゼロとした。これらの図から、単調載荷曲線に準ずる領域を表現する構成式(2)は、試験結果を適切に表現できることが確かめられる。得られたステンレス鋼及び超鉄鋼に関する構成式に含まれる材料定数を表-1 に示す。

4.2 線形遷移領域

図-18 から図-21 に示す弾性域の減少を照査する試験から得られた線形遷移領域を表す太い実線部分と単調載荷曲線上の塑性ひずみの関係を図-22 と図-23 に示す。線

表-2 線形遷移領域に関する材料定数

	SUS304	SUS304N2	超鉄鋼	
			J	ST
c	0.668	0.619	0.196	0.112

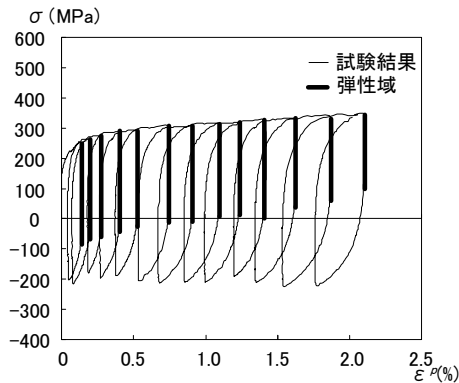


図-18 SUS304

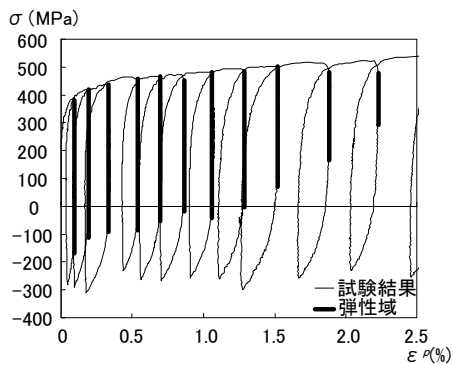


図-19 SUS304N2

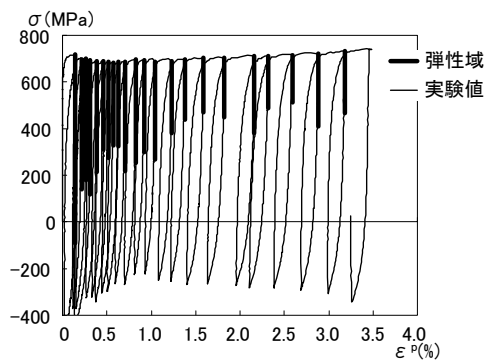


図-20 J材

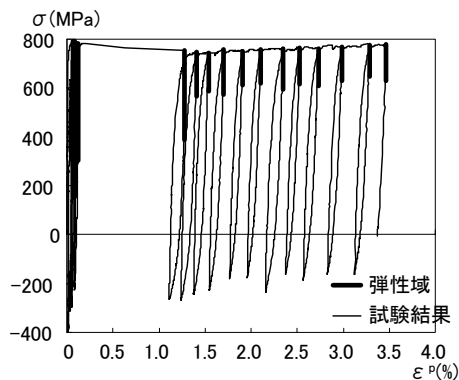


図-21 ST材

形遷移領域の大きさは、除荷開始点から 0.03%オフセット法（超鉄鋼）と 0.01%オフセット法（ステンレス鋼）を用いて決定した。線形遷移領域の開始点は、除荷による瞬時の軟化を考慮し、塑性ひずみの反転部とした。両図より、超鉄鋼材料の線形遷移領域の大きさは、SUS304 および SUS304N2 に比べて 1/3 から 1/6 程度小さくなる ことがわかる。図-22 の SUS304N2 に着目してみると、他の鋼種に比べてばらつきが大きいことがわかる。また、SUS304 に着目してみると、単調载荷曲線上の塑性ひずみの増大とともに弾性域の大きさが徐々に小さくなっている。このため、SUS304、SUS304N2 の線形遷移領域を表現する構成式に含まれる材料定数は、試験で測定した単調载荷曲線上の塑性ひずみ 3%付近での弾性域の大きさとして決定した。単調载荷曲線上の塑性ひずみ約 3%での弾性域の大きさとした理由は、SUS304 ではこれ以降の弾性域の大きさがほぼ一定に収まっているためである。各鋼材の線形遷移領域に関する各鋼材の材料定数 c をまとめたものを表-2 に示す。

4.3 非線形遷移領域

図-24 と図-25 にステンレス鋼と超鉄鋼の非線形遷移領域の大きさと単調载荷曲線上の塑性ひずみの関係を示す。これらの図は、点で表す両振り試験により得られた結果を、非線形遷移領域における構成式 (5) にて回帰計算を行い、鋼材に関するパラメータ d, e を求め、それらを代入して表した結果を実線で示している。図-24 のステンレス鋼に着目してみると、図-25 の超鉄鋼に比べて試験結果にばらつきが大きくなっていることがわかる。特に SUS304N2 で大きくなっている。一方、図-25 の超鉄鋼に着目してみると、構成式は、J 材と ST 材共に精度良く試験結果を表現していることがわかる。また、超

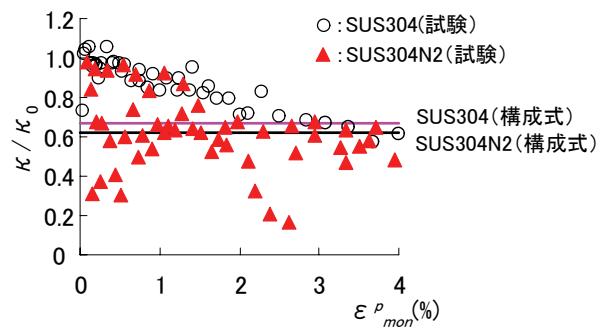


図-22 弾性域の減少（ステンレス鋼）

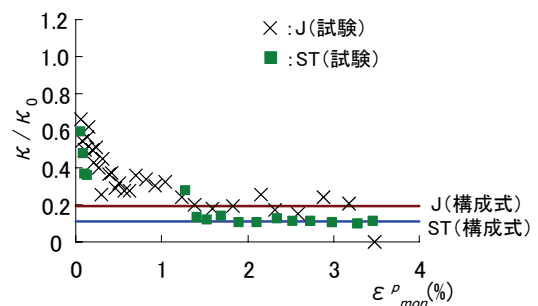


図-23 弾性域の減少（超鉄鋼）

表-3 非線形遷移領域に関する定数

	SUS304	SUS304N2	超鉄鋼	
			J	ST
d	17.1	26.0	2.48	0.823
e	1.63	2.67	1.43	0.600
f	54.9	30.8	5.57	9.20
g	-1.44	-0.805	-0.660	-0.192

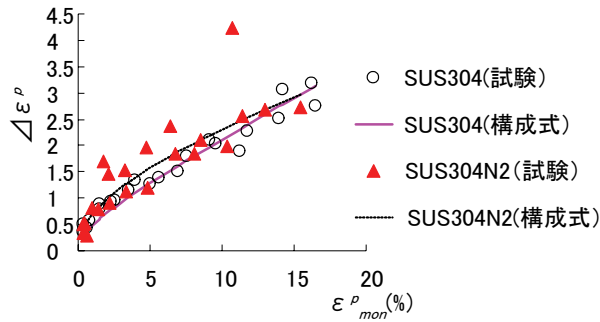


図-24 非線形遷移領域の大きさと単調荷重曲線上の塑性ひずみの関係 (ステンレス鋼)

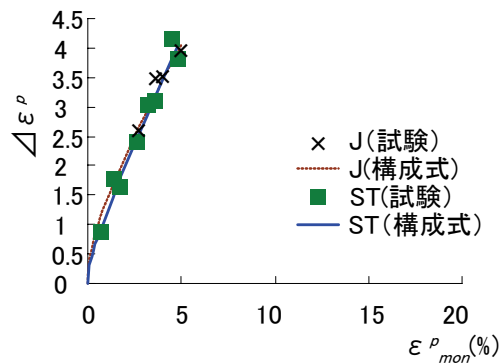


図-25 非線形遷移領域の大きさと単調荷重曲線上の塑性ひずみ関係 (超鉄鋼)

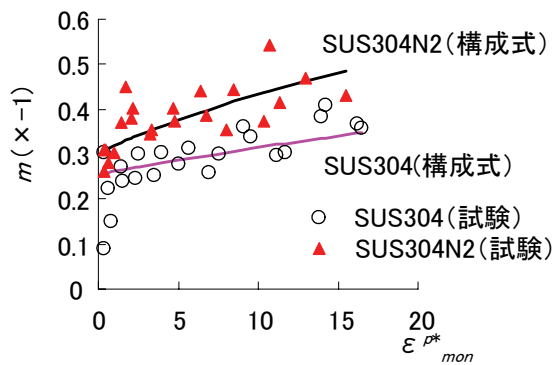


図-26 m と ε^{p*}_{mon} の関係 (ステンレス鋼)

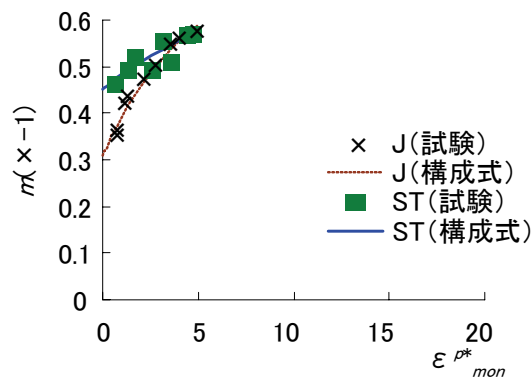


図-27 m と ε^{p*}_{mon} の関係 (超鉄鋼)

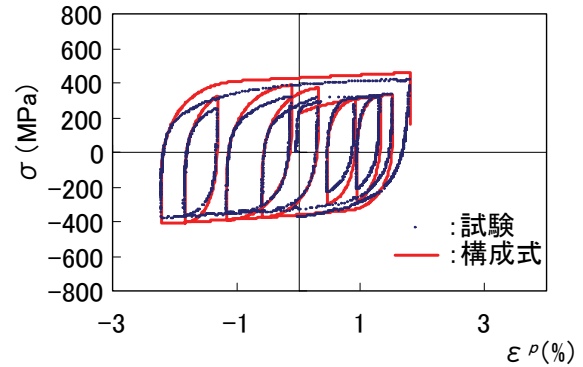


図-28 SUS304

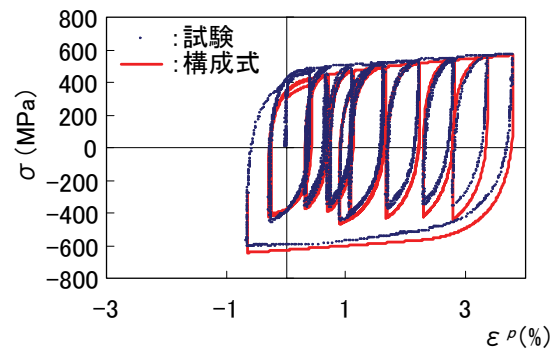


図-29 SUS304N2

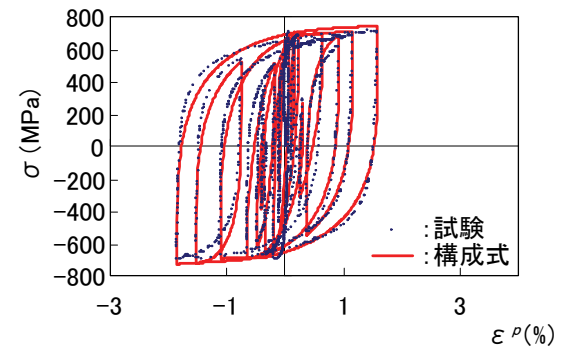


図-30 超鉄鋼 (J 材)

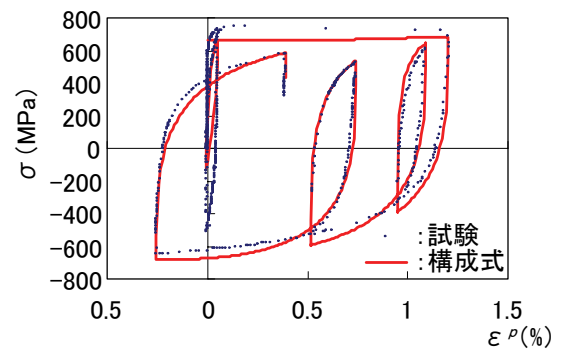


図-31 超鉄鋼 (ST 材)

鉄鋼とステンレス鋼を比較してみると、単調載荷曲線上の塑性ひずみの違いが顕著である。これより、ステンレス鋼の非線形遷移領域は超鉄鋼に比べて小さいことが明らかとなった。

ステンレス鋼と超鉄鋼のひずみ硬化開始後の各ループのひずみ硬化開始点からの塑性ひずみと非線形遷移領域の曲率の係数に式(6)を回帰したものを図-26 と図-27 に示す。両図を比較してみると、図-24 と図-25 の結果と同様にステンレス鋼の結果は超鉄鋼に比べてばらつきが大きくなっていることがわかる。

非線形遷移領域を表す、構成式 (5), (6) に含まれる材料定数を表-3 にまとめる。

5. 数値シミュレーションの精度の検証

4. で求めたステンレス鋼と超鉄鋼の構成式に含まれる材料定数を用いて、数値シミュレーションが試験結果を精度良く再現できるかを検証するため、荷重をランダムに変化させた試験を実施した。図-28 から図-31 にステンレス鋼と超鉄鋼の試験結果を点で、数値シミュレーションを実線で示す。

図-28 の SUS304 では、構成式が試験結果に比べてわずかに応力が大きくなっているが、おおよその一致が確認できる。図-29 の SUS304N2 については、圧縮時に構成式が試験結果よりも大きくなるが、各領域において精度の良い結果が得られている。図-30 と図-31 に示す超鉄鋼 (J 材, ST 材) では、構成式が試験結果を精度よく再現していることがわかる。これより、本研究で対象としたステンレス鋼 (SUS304, SUS304N2) と超鉄鋼 (J 材, ST 材) の数値シミュレーションと試験結果の差は、普通鋼⁵⁾の結果と同様に僅かなことから、対象とした鋼種への普通鋼に用いられる構成式の適用性が認められる。

6. まとめ

本研究では、超鉄鋼とステンレス鋼が繰り返し荷重を受ける場合の応力ひずみ関係を材料試験によって明確にすると共に、数値計算に必要なとなる材料構成式について、

普通鋼に用いられている構成式の適用性の検証を行った。本研究で得られたまとめを以下に述べる。

- (1) SUS304, SUS304N2 共に塑性化後のひずみ硬化が大きい。
- (2) 単調載荷試験および繰り返し載荷試験から SUS304 と SUS304N2 の異方性はほとんど見られない。
- (3) 超鉄鋼材料 J 材, ST 材共に降伏後もわずかなひずみ硬化が発生する。
- (4) 単調載荷曲線に準ずる領域において、いずれの鋼種も構成式は試験結果を精度良く表現できる。
- (5) 線形遷移領域において、その大きさは初期の段階から常に一定としても構成式は試験結果を精度良く表現できる。
- (6) 普通鋼に適用される構成式は、SUS304, SUS304N2 と超鉄鋼 (J 材, ST 材) に適用できる。

今後、本研究で対象とした SUS304, SUS304N2, 超鉄鋼について、普通鋼と同様にしてこれらの構成式を多次元に拡張した場合の精度を確認する予定である。

参考文献

- 1) ステンレス構造建築協会：ステンレス建築構造設計基準・同解説、技報堂出版、2001.5.
- 2) 松下裕明，岩田節雄，有住康則，矢吹哲哉：ステンレス鋼板を普通鋼で補剛したハイブリッド補剛板の軸圧縮耐荷力特性，構造工学論文集，土木学会，Vol.49A，pp.833-844，2003.3.
- 3) 松下裕明，矢吹哲哉，有住康則，岩田節男：ステンレス鋼を用いた I 型断面桁腹板のせん断耐力に関する実験的研究，土木学会，構造工学論文集 Vol.50A，pp.799-808，2003.9.
- 4) 鈴木雄大，小野潔，池内智行，岡田誠司，西村宣男，高橋実：実用的な鋼材の構成式の開発，第 6 回地震時保有水平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，pp.351-358，2003.1.
- 5) 西村宣男，小野潔，池内智行：単調載荷曲線を基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，pp27-38，1995.4.
(2006 年 9 月 11 日受付)