

繰り返し軸方向変位に対する 埋設鋼管の非弾性座屈強度

INELASTIC LOCAL BUCKLING OF STRAIGHT PIPE UNDER CYCLIC AXIAL DEFORMATIONS

鈴木 信久* 大場 修幸*

By Nobuhisa SUZUKI and Syuhkoh OHBA

This paper presents an experimental study on inelastic local buckling of steel pipes loaded by compression or cyclic axial deformations. Pipelines buried in an earthquake environment are liable to suffer dynamic and static differential ground movements which may result in the inelastic behavior of the pipes. A series of experiments was carried out using steel pipes with D/t of 22.6, 35.0 and 55.4. The pipes buckled under the cyclic axial deformations in accordance with the increase in number of cycles even if the compressive strains did not exceed the static critical strain. A simple relationship between the number of cycles of the deformations and strain amplitude is proposed.

1 緒 言

本論文は、地震時に発生する地盤の動的繰り返し変位に対する埋設鋼管(直管)の塑性域における座屈強度について検討したものである。

埋設管路は地震波動の伝播、不均一地盤における動的応答変位、あるいは液状化に伴って発生する様々な地盤変状[1]によって変形を受けることがある。溶接鋼管の地震被害では、直管の座屈、曲管の大変形等が確認されており、管の非弾性領域における繰り返しを伴う変形特性が管路の耐震性に関して重要な検討課題の一つとなっている[2]。鋼材の塑性域における優れた変形能力は、埋設鋼管路の耐震設計指針[3][4]に既に導入されており、合理的な耐震設計が進められているが、繰り返し変位入力が考慮されている[4]でも、地盤の繰り返し変位に対する管の強度検討が若干不足している様に思われる。

そこで本論文では、ガス導管に使用されている圧力配管用炭素鋼鋼管(JIS-G-3454/STPG38)を対象に、まず材料の変形特性を調べるため試験片の引張試験及び繰り返し変形試験を行ない、さらに短管の座屈実験により圧縮座屈強度及び繰り返し軸方向変位に対する座屈強度を求めている。そして最後に、入力ひずみ振幅と座屈発生回数の関係を求める実験式を提案している。

* NKK/日本鋼管(株) 応用技術研究所 第一研究部 (〒210 神奈川県川崎市南渡田町 1-1)

2 実験の概要

材料の引張試験には、外径114.3mm、管厚6.0mmの管から切り出した短冊型試験片(JIS-12C号)を使用し、履歴特性を調べるための繰返し変形試験では中実円柱状試験片を使用した。

圧縮座屈実験と繰返し座屈実験では、管外径Dと管厚tの比D/tが22.6(D=113mm,t=5mm),35.0(133,3.8),55.4(133,2.4)の三種類の供試体(短管)を使用した。供試体の一般形状をFig.1に示す。この供試体は D/t=22.6がD=114.3,t=6.0、D/t=35.0がD=139.8,t=6.6、D/t=55.4がD=139.8,t=5.1 からそれぞれ機械加工したものである。

実験装置はFig.2に示す様にテストベッド上に門型フレームを組み立て、フレーム下部に載荷容量100tonのアクチュエータを設置したものである。

3 材料の変形特性

3.1 引張・圧縮変形特性

Fig.3に試験片の引張試験で得られた応力～ひずみ関係を示す。また、座屈実験で得られた短管の応力～ひずみ線図も比較のため同図に示す。図の様に、材料は引張及び圧縮過程共にほぼ同様な応力～ひずみ関係を示しているが、座屈実験では局部座屈発生と同時に応力低下が認められた。

材料の応力～ひずみ関係を「4.圧縮座屈強度」で参照するため(1)式の Ramberg-Osgood の式で近似する。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left\{ 1 + \frac{3}{7} \left(\frac{\sigma}{\sigma_R} \right)^{n-1} \right\} \quad (1)$$

ここに、E:弾性定数、 σ_R : $E_s=0.7E$ と曲線の交点の応力、n:ひずみ硬化指数である。

ただし、本論文ではFig.3の様に降伏棚のある材料で、ひずみ硬化域で座屈する形状(D/t)の鋼管を主に対象とするため、応力～ひずみ関係はFig.4の様にひずみ硬化開始以前の弾性域及び降伏棚を無視し、(1)式を次式の様に変形しておく。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_r} \left\{ 1 + \frac{3}{7} \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^{n-1} \right\} \quad (2)$$

ここに、 $E_r=10/7 E_{os}$ 、 $(\varepsilon_o, \sigma_o)$:ひずみ硬化開始点の座標値、 E_{os} :ひずみ硬化開始点の割線係数(= $\sigma_o /$

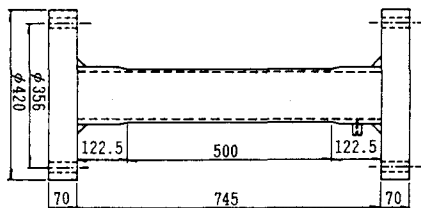


Fig.1 Specimen for compressive and cyclic loading tests

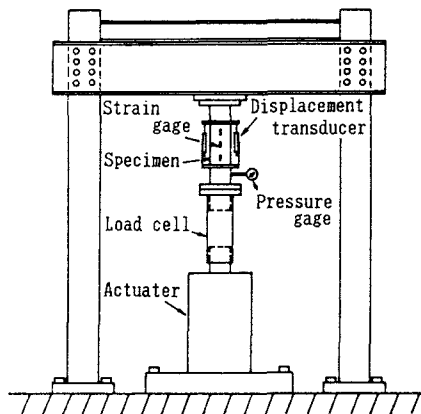


Fig.2 Buckling test apparatus

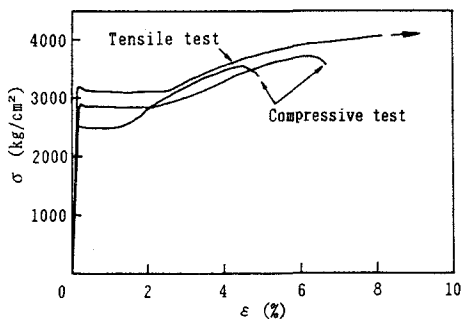


Fig.3 Stress-strain relationships of tensile and compressive tests

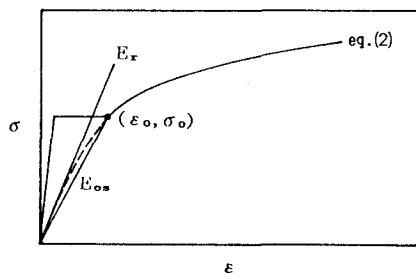


Fig.4 Ramberg-Osgood approximation for strain hardening region

ε_o)である。Fig.3に関する材料の特性値及び(2)式のパラメータを Table 1 に示す。

Table 1 Parameters for $\sigma \sim \varepsilon$ relationships

	Compression	Tension	Unit
E_r	1.48~2.25	1.84	10^8kgf/cm^2
σ_o	2.64~2.94	2.94	10^3kgf/cm^2
ε_o	1.5~3.0	2.5	%
n	5.7~6.3	7.4	---
m	0.31~0.33	---	---

3.2 繰り返し変形特性

ひずみ制御型の繰り返し変形試験で得られた応力～ひずみ履歴曲線をFig.5に示す。履歴曲線は前項の圧縮あるいは引張試験の応力～ひずみ線図と異なり、二回目の圧縮過程から降伏棚が消え、残留応力のある材料の応力～ひずみ線図のパターンを示す。この履歴曲線は繰り返し回数が4～5回目以降の安定した状態のものである。

従って履歴曲線は、(1)式を骨格曲線として(3)式の様に表される。

$$\frac{\varepsilon \pm \varepsilon_a}{2} = \frac{\sigma \pm \sigma_a}{2E} \left\{ 1 + \frac{3}{7} \left(\frac{\sigma \pm \sigma_a}{2\sigma_R} \right)^{n-1} \right\} \quad (3)$$

ここに、 σ_a :応力振幅、 ε_a :ひずみ振幅 である。また、上式は複号同順で、+が圧縮過程、-が引張過程に対応する。

実験データを整理すると、Fig.6の様にEはほぼ一定値となるが、 σ_R とnはFigs.7,8の様に ε_a の線形関数で表される。

4 圧縮座屈強度

4.1 圧縮座屈実験結果の概要

短管の圧縮座屈実験で得られた荷重と変位量の関係をFig.9に示す。D/t=22.6と35.0では材料の降伏特性が明確に認められ、さらにひずみ硬化特性を示して荷重が漸増した後に局部座屈し、荷重が低下している。一方、D/t=55.4は降伏直後に局部座屈しており、降伏棚も硬化特性も認められない。

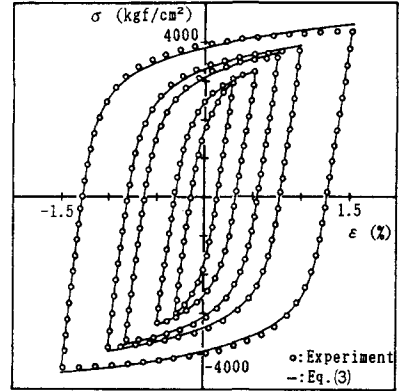


Fig.5 Stress~strain relationships of cyclic loading tests

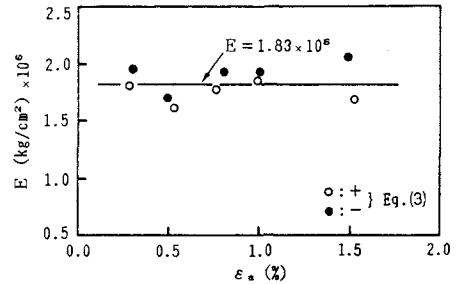


Fig.6 $E \sim \varepsilon_a$ relationship

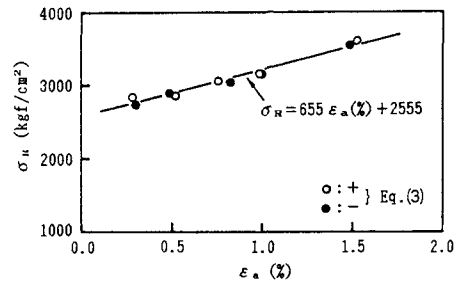


Fig.7 $\sigma_R \sim \varepsilon_a$ relationship

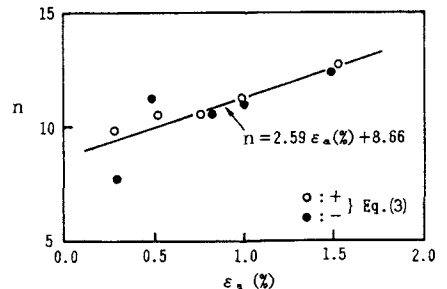


Fig.8 $n \sim \varepsilon_a$ relationship

供試体の管軸に沿った軸方向ひずみ分布の変化状況を $D/t=35.0$ について Fig.10 に示す。軸方向ひずみが降伏棚の変位ステップ②にある場合には、図の様にひずみ分布が全体的にばらつくと同時に小さな座屈波形が観察されたが、変位ステップが③のひずみ硬化領域に入るとひずみはほぼ一様に分布し、座屈波形は消滅した。更に変位ステップが⑥～⑦に進むとひずみ分布が再び乱れ、座屈波形が再現した。そして⑦では最高荷重に達すると同時に供試体の軸剛性が急激に低下して局部座屈した。

$D/t=22.6$ についても Fig.10 の $D/t=35.0$ と同様な挙動を示したが、 $D/t=55.4$ は降伏棚の領域で局部座屈したため、②～⑦における変形パターンが降伏直後の小さな変位量の中に集中して表れている。

4.2 圧縮座屈ひずみ

Fig.11 は横軸に公称軸ひずみ $\varepsilon_n = \Delta l / l$ 、縦軸には座屈波形内におけるひずみの測定値 ε_m と ε_n の比、 $\varepsilon_r = \varepsilon_m / \varepsilon_n$ をとって圧縮変形に伴う軸ひずみの変化を表している。座屈ひずみは図の様に、 $\varepsilon_r = 1$ と座屈後の直線部分の延長線との交点から求めた。

軸圧縮力に対する変形理論に基づく座屈ひずみ ε_b は次式で表される [5]。

$$\varepsilon_b = C \left\{ \frac{1-\nu^2}{1-\nu_p^2} \right\}^{1/2} \left\{ \frac{E_t}{E_s} \right\}^{1/2} \frac{t}{r} \quad (4)$$

ここに、 C : 局部座屈パラメータ ($=1/\{3(1-\nu_p^2)\}^{1/2}$)、 ν : 弾性域ポアソン比、 ν_p : 塑性域ポアソン比、 E_t : 接線係数、 E_s : 割線係数、 t : 管厚、 r : 管厚中心半径である。ただし、 $\nu=0.3$ 及び材料の非圧縮性を仮定して $\nu_p=0.5$ とすると $C=2/3$ となる。

(2) 式で表されるひずみ硬化領域の応力～ひずみ曲線から E_t , E_s を求め、(4) 式に代入すると ε_b は (5) 式の様に分得られる。

$$\varepsilon_b = \frac{4}{3} \left[\frac{7+3(\sigma_b/\sigma_o)^{n-1}}{7+3n(\sigma_b/\sigma_o)^{n-1}} \right]^{1/2} \frac{t}{d} \quad (5)$$

ただし、 σ_b は座屈応力、 d は管厚中心半径で $d=2r$ である。

ε_b は (2) 式の応力～ひずみ関係をも満足する必要があるため、(2) 式で $\sigma=\sigma_b$ としたものと (5) 式を連立して解くことになる。Table 1 のデータを代入して得られた ε_b を Fig.12 に示す。実験結果と (5) 式の値を比較すると、 $D/t=22.6$ と 35.0 については比較的良好な近似値

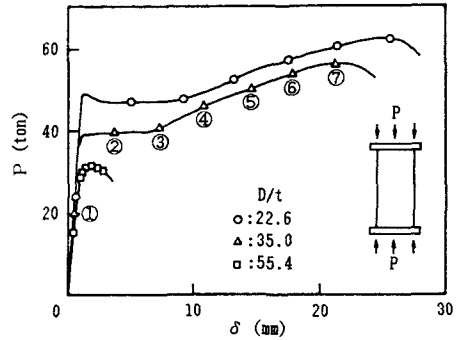


Fig.9 Load~displacement curves of compressive tests

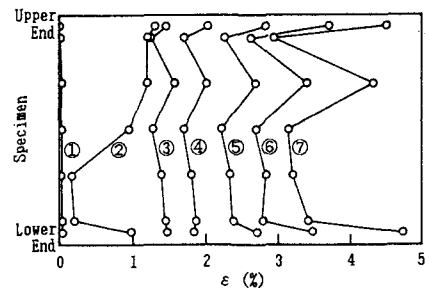


Fig.10 Axial strain distribution during a compressive test

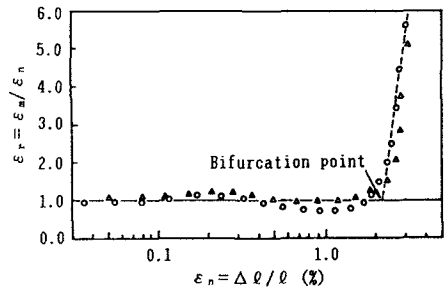


Fig.11 Definition of a bifurcation point of compressive tests

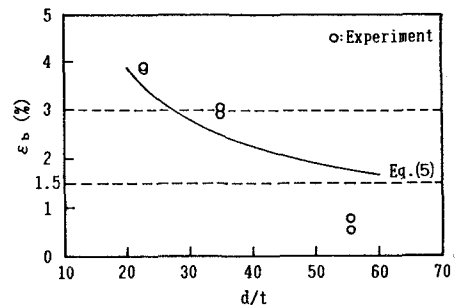


Fig.12 Comparison of measured and calculated buckling strains

を与えているが、 $D/t=55.4$ は約1/2程度の値となっている。これは、 $D/t=22.6$ と 35.0 はひずみ硬化域で座屈したのに対し、 $D/t=55.4$ は降伏棚($E_t=0$)の領域で座屈したためである。降伏棚のある材料で、ひずみ硬化域で座屈する d/t の最小値は(5)式に $\sigma_b/\sigma_o=1$ 、 $\varepsilon_b=\varepsilon_o$ を代入して次式で与えられる。

$$(d/t)_{\min} = 4/3 \cdot [(7+3)/(7+3n)]^{1/2} \cdot 1/\varepsilon_o \quad (6)$$

この様に、 $(d/t)_{\min}$ はひずみ硬化開始ひずみ ε_o に反比例することになる。Table 1 を参考に、 $n \approx 6$ 、 $\varepsilon_o=0.015 \sim 0.030$ とすると $(d/t)_{\min}$ は、

$$(d/t)_{\min} = 58.6 \sim 29.3 \quad (7)$$

となり、 $D/t=55.4$ ($d/t=54.4$)は降伏棚の領域で座屈する可能性が高い。

高圧ガス導管耐震設計指針[4]では、残留応力のある材料の塑性域における応力～ひずみ関係(Fig.4の実線部分に対応)を(8)式の様にべき乗硬化則で表わし[6]、座屈ひずみ ε_b を(9)式の様にシンプルに表わしている。(9)式と(5)式を比べると、応力～ひずみ関係については(5)式の方が回帰精度が良いのに対し、(9)式は収束計算の必要が無いのが特長である。

$$\sigma/\sigma_y = (\varepsilon/\varepsilon_y)^m \quad (8) \quad \varepsilon_b = 4/3 (m)^{1/2} t/d \quad (9)$$

耐震設計指針[4]では、残留応力とは無関係に $m=0.11$ 、安全率1.25を採用し、座屈ひずみ ε_b を、

$$\varepsilon_b \approx 1/1.25 \cdot 4/3 (0.11)^{1/2} t/d \approx 35 t/d(\%) \quad (10)$$

を与えている。ただし、(8)式をFig.4の様にひずみ硬化域にのみ対応させて考えれば、(9)、(10)式もFig.3の様に残留応力の無い材料についても適用可能となる。

(8)式は塑性域における応力～ひずみ関係を表す Ramberg-Osgood の式((2)式)と次の関係がある。即ち、(8)式で $\sigma_y=\sigma_o$ 、 $\varepsilon_y=\varepsilon_o$ として(2)式と連立させると(11)式が得られ、 m は(12)式となる。

$$\varepsilon_o(\sigma/\sigma_o)^{1/m} = \sigma/E_r \{1 + 3/7 (\sigma/\sigma_o)^{n-1}\} \quad (11)$$

$$m = \log \beta / \{ \log \beta (7+3n) - 1 \} \quad (12)$$

ここに、 $\beta=\sigma_b/\sigma_o$ である。

また、(2)式と(8)式で表される応力～ひずみ曲線はFig.13に示す様に、 $(\sigma_o, \varepsilon_o)$ 、 $(\sigma_b, \varepsilon_b)$ の二点を共有している。 $(\sigma_b, \varepsilon_b)$ を表す β は最小二乗法で得られ、Fig.3について計算したところ、 $\beta=1.2 \sim 1.3$ であった。Table 1 に $\beta=1.2$ とした m の値を示すが、本論文では $m=0.30 \sim 0.35$ となって、耐震設計指針[4]で採用されている値の約3倍になっている。従って、ひずみ硬化域で座屈する $D/t=22.6$ 、 35.0 について(10)式は2倍以上($1.25 \times 3^{1/2} \approx 2.17$)の安全率があることになる。

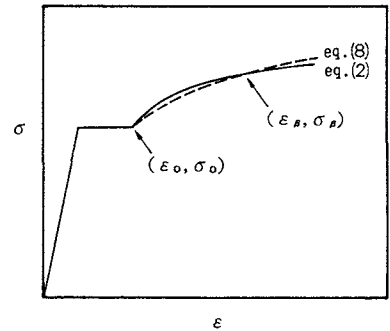


Fig.13 R-O model and power hardening

5 繰り返し変位に対する座屈強度

5.1 繰り返し座屈実験結果の概要

繰り返し座屈実験では、最初の変位を圧縮過程から与え、供試体に一定の変位振幅を与えた。変位を繰り返して与えると、管には座屈波が次第に発生し、更に変位を繰り返すと、Fig.14に示す様に座屈波の山あるいは端部に疲労き裂が発生した。

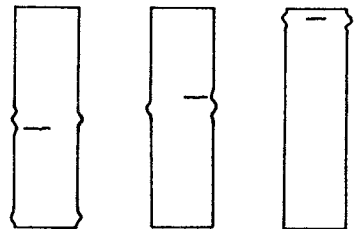


Fig.14 Observed wrinkles and cracks after cyclic loading tests

繰返しに伴う荷重～変位の履歴曲線の例をFig.15に示す。この図では4～5サイクル目までは材料が硬化しているが、それ以降は一定の履歴曲線を描き、局部座屈発生後は徐々に荷重が低下している。これは繰返しの初期の段階で座屈するD/t=55.4を除いて共通した傾向である。

繰返し回数の増加に伴ない、軸ひずみ(全ひずみ)の振幅と平均はFig.16、17に示す様に次第に変化している。Fig.16は座屈波から離れた部分の軸ひずみの変化で、座屈波形の進行に伴ってひずみ振幅は減少している。一方Fig.17は、座屈波形内にある点のひずみ変化で、ひずみ振幅、平均ひずみ共に繰返し回数の増加に伴って漸増している。

繰返しの初期段階で設定したひずみ振幅 ε_a と局部座屈発生までの繰返し回数 N_b の関係をFig.18に示す。図の様に、 ε_a と N_b の関係はD/tをパラメータに表される。ただし、 N_b はFigs.16,17の様に平均ひずみの変化点とした。

5.2 繰返し変位過程における座屈ひずみ

短管の軸方向に繰返し変位を与え、ひずみ振幅 ε_a を発生させると、応力～ひずみ関係はFig.19の様にP→Q(圧縮)、Q→P(引張)の履歴をたどる。図の圧縮過程P→QのうちP→Aは除荷、A→Qは圧縮ステップとなっている。

図中BはAQ上、あるいはAQの延長QQ'上の点であり、Aを座標原点とした応力～ひずみ線図AQQ'から得られる座屈発生点である。ただし、BがQよりも左側にある場合には最初の繰返しにおける圧縮過程で座屈するが、BがQよりも右側にある場合には、本来ならば繰返し履歴の過程では局部座屈が発生しない条件になる。

Aを座標原点とした履歴曲線(圧縮過程)は(3)式を変形して次式で表される。

$$\frac{\varepsilon + \varepsilon_{PA}}{2} = \frac{\sigma + \sigma_a}{2E} \left\{ 1 + \frac{3}{7} \left(\frac{\sigma + \sigma_a}{2\sigma_R} \right)^{n-1} \right\} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{PA} = \frac{\sigma_a}{E} \left\{ 1 + \frac{3}{7} \left(\frac{\sigma_a}{2\sigma_R} \right)^{n-1} \right\} \div \frac{\sigma_a}{E} \quad (14)$$

ここに、 ε_{PA} はPA間のひずみの絶対値である。

更に(14)式を整理すると(15)式が得られる。

$$\varepsilon = \frac{\sigma + \sigma_a}{E} \left\{ 1 + \frac{3}{7} \left(\frac{\sigma + \sigma_a}{2\sigma_R} \right)^{n-1} \right\} - \varepsilon_{PA} \quad (15)$$

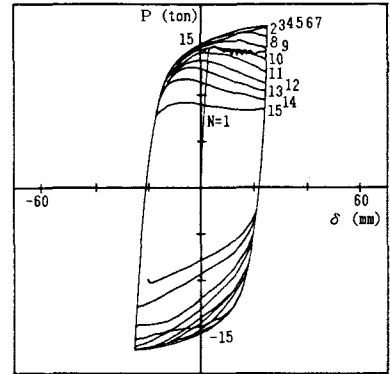


Fig.15 Load～displacement curves of a cyclic loading test

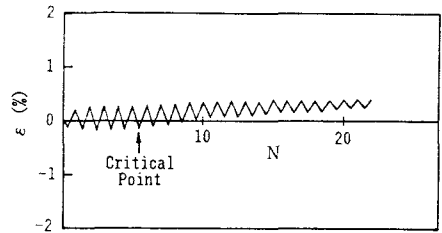


Fig.16 Development of axial strain during a cyclic loading test

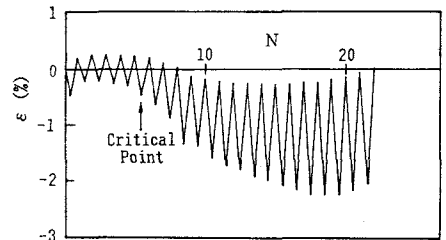


Fig.17 Development of axial strain during a cyclic loading test

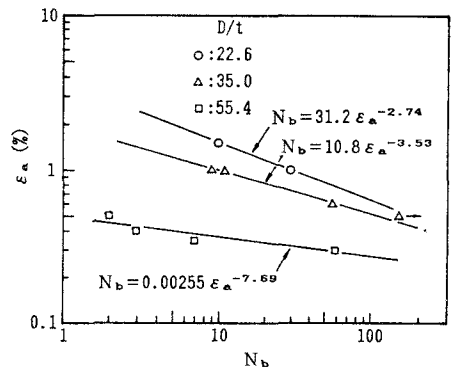


Fig.18 $\varepsilon_a \sim N_b$ relationship

従って、 E_t, E_s は(15)式から次式の様になる。

$$\frac{d\varepsilon}{d\sigma} = \frac{1}{E_t} = \frac{1}{E} \left\{ 1 + \frac{3}{7} n \left(\frac{\sigma + \sigma_a}{2\sigma_R} \right)^{n-1} \right\} \quad (16)$$

$$\frac{\varepsilon}{\sigma} = \frac{1}{E_s} = \frac{1}{E} \frac{\sigma + \sigma_a}{\sigma} \left\{ 1 + \frac{3}{7} n \left(\frac{\sigma + \sigma_a}{2\sigma_R} \right)^{n-1} \right\} - \frac{\varepsilon_{PA}}{\sigma} \quad (17)$$

E_t, E_s を(4)式に代入すると、履歴曲線から得られる座屈ひずみ ε_{hb} (発生位置はFig.19のB点となる)は次式で表される。

$$\varepsilon_{hb} = \frac{4}{3} \left[\frac{(\sigma_b + \sigma_a) \{7+3\gamma^{n-1}\} - 7\sigma_a}{\sigma_b \{7+3n\gamma^{n-1}\}} \right]^{1/2} \frac{t}{d} \quad (18)$$

ここに、 $\gamma = (\sigma_b + \sigma_a)/(2\sigma_R)$ で、 ε_{hb} は(15)式と(18)式を連立して得られる。

(18)式の ε_{hb} を d/t について ε_a をパラメータにしてFig.20に示すが、Fig.5の様に履歴曲線の形状が ε_a の変化に対して余り敏感でないため、ほぼ一定の関数になっている。比較のため、骨格曲線を(5)式に代入して得られた圧縮座屈ひずみをFig.20に示す。図の様に ε_{hb} は ε_b よりも絶対値で約1%小さくなっている。

Fig.20の $\varepsilon_{hb} \sim d/t$ の関係について視点を換え、 $H_b \sim d/t$ の関係を ε_a をパラメータにしてFig.21に示す。ここに、 H_b は Fig.19の圧縮過程で発生する圧縮ひずみ $\varepsilon_{hc} = 2\varepsilon_a - \varepsilon_{PA}$ と(18)式の履歴曲線上の座屈ひずみ ε_{hb} との比で、 $H_b = \varepsilon_{hc}/\varepsilon_{hb}$ で表される。図中、 $1 \leq H_b$ ($0 \leq \varepsilon_{hb} \leq \varepsilon_{hc}$)は履歴曲線中で座屈する条件を表わし、 $0 \leq H_b < 1$ ($0 \leq \varepsilon_{hc} < \varepsilon_{hb}$)は履歴曲線の延長上で座屈する条件を表しており、本来ならば繰り返し変形の過程で発生する圧縮ひずみで静的には座屈しない領域となっている。

ところが、本論文の実験結果の様に、本来ならば局部座屈が発生しない $0 \leq H_b < 1$ の領域でも、繰り返し変位入力回数が増加するに従って局部座屈が発生することがある。

5.3 座屈発生繰り返し回数

Fig.18に示した座屈発生回数 N_b を前項の $H_b = \varepsilon_{hc}/\varepsilon_{hb}$ について整理したものをFig.22に示す。図では H_b と N_b の関係は $D/t=22.6$ 、35.0については同一線上にプロットされて D/t とは独立に、(19)式で表されるが、 $D/t=55.4$ は両者の下側で、(20)式で表される。

$$N_b = 12.0 H_b^{-2.89} \quad (19)$$

$$N_b = 0.0584 H_b^{-7.04} \quad (20)$$

この様に異なった式で表されるのは、「4.2 圧縮座屈

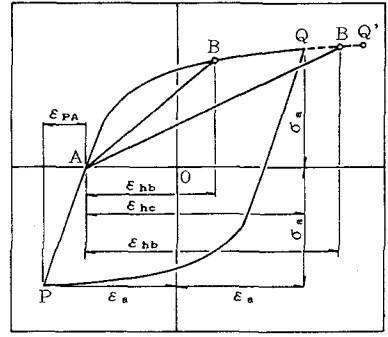


Fig.19 Schematic diagram of hysteresis loop and buckling strain

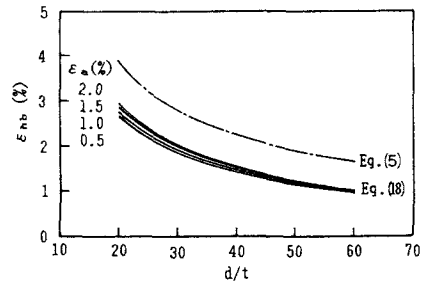


Fig.20 Buckling strains for various strain amplitudes

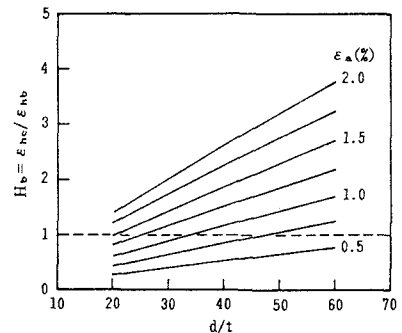


Fig.21 Ratio of compressive strain of cyclic deformation to buckling strain

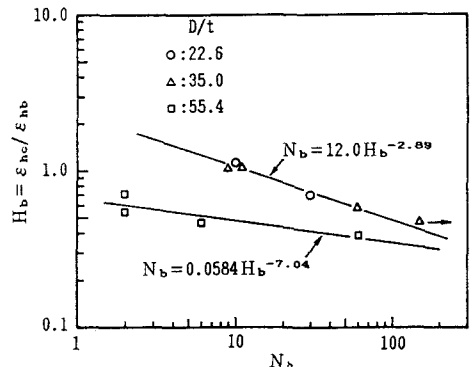


Fig.22 $H_b \sim N_b$ relationship

ひずみ」でも触れた様に、 $D/t=22.6, 35.0$ はひずみ硬化域で座屈しているのに対し、 $D/t=55.4$ は降伏棚の領域で座屈し、他とは異なる座屈様式を示しているためである。そこで、本論文では降伏棚の領域で座屈する D/t ((20)式)は除外し、ひずみ硬化域で座屈する D/t ((19)式)にしばって考察することとする。

ひずみ硬化域で座屈する管の N_b は、 ε_a と d/t を与え、(19)式とFig.21を使って求められる。例えば、 $d/t=35.0$ で $\varepsilon_a=1.0\%$ ((10)式の圧縮座屈ひずみ)とした場合、① Fig.21の横軸の $d/t=35.0$ と $\varepsilon_a=1.0\%$ の交点から縦軸の $H_b \doteq 1$ を読み、② $H_b=1$ を(19)式に代入して $N_b=11.9 \doteq 11$ を得る。ここで少々面倒なのは、Fig.20で H_b を読み取ることであるが、 H_b はFig.21に示した様に緩やかに上に凸な関数となっており、近似的には線形関数で表すことができる。ここでは最も簡単な方法として、Fig.21の $d/t=30$ における H_b を座標原点と結ぶ直線群で近似して、 H_b を、

$$H_b = (0.0035 \varepsilon_a^2 + 0.0268 \varepsilon_a) (d/t) \quad (21)$$

の様に $\varepsilon_a(\%)$ と d/t の簡単な関数で表すこととする。したがって N_b は、(21)式を(19)式に代入して、

$$N_b = 12.0 [(0.0035 \varepsilon_a^2 + 0.0268 \varepsilon_a) (d/t)]^{-2.69} \quad (22)$$

となる。

6 結 言

管軸方向に圧縮変位あるいは繰り返し変位を受ける真っ直ぐな鋼管(STPG38)の座屈強度について実験的に検討し、以下の結論を得た。

- (1) ひずみ硬化域で圧縮座屈が発生する管厚比は $d/t \leq 84.3 / \varepsilon_o$ であり、これ以上の管厚比では、局部座屈が降伏棚あるいは弾性域で発生する。(ただし、 $\varepsilon_o(\%)$:硬化開始ひずみ)
- (2) ひずみ硬化域で座屈する d/t の鋼管に1サイクル目の履歴過程では座屈しない範囲の軸ひずみをひずみ振幅とする繰り返し変位を与えると、繰返し回数の増加に伴って座屈波が発生する。
- (3) 局部座屈発生までの繰り返し回数 N_b は、 $N_b=12.0[(0.0035 \varepsilon_a^2 + 0.0268 \varepsilon_a)(d/t)]^{-2.69}$ で表わされる。(ただし、 $\varepsilon_a(\%)$:ひずみ振幅、 d :管厚中心直径、 t :管厚)

参 考 文 献

- [1] 浜田政則, 安田 進, 磯山龍二, 恵本克利: '液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究', 土木学会論文集, 第376号/Ⅲ-6, p221~229, 1986年12月.
- [2] 鈴木信久: '埋設パイプラインの地震時信頼性評価', HPI技術セミナー, 石油貯槽技術基準と安全性, (社)日本高圧力技術協会, p73~86, 1983年2月.
- [3] (社)日本水道協会: 水道施設耐震工法指針・解説, 1979.
- [4] (社)日本ガス協会: ガス導管耐震設計指針, 1982年3月.
- [5] Gerard G.: 'Compressive and Torsional Buckling of Thin Wall Cylinders in Yielded Region', NACA, TN, No. 3726, Aug., 1956.
- [6] 加藤 勉, 秋山 宏, 鈴木弘之: '軸圧縮力を受ける鋼管の塑性局部座屈耐力', 日本建築学会論文報告集, 第204号, p9~17, 1973年2月.

(1988年10月12日受付)