

円周方向面内圧縮力を受ける鋼円筒パネルのダクティリティーと幅厚比

DUCTILITY AND WIDTH-TO-THICKNESS RATIO OF STEEL CYLINDRICAL PANELS
SUBJECTED TO CIRCUMFERENTIAL COMPRESSION

三上 市蔵* 辻 省悟** 中野 唯史*** 竹原 和夫***

By Ichizou MIKAMI, Shogo TSUJI, Tadashi NAKANO, and Kazuo TAKEHARA

The ductility is one of the important mechanical properties, when the destruction of materials is discussed. However, the ductility of steel structures was not very often discussed until now, because it is believed that the steel has enough deformation properties. Thus, the ductility of steel structures has not been known well.

In this paper, nonlinear behavior of elasto-plastic cylindrical panels subjected to circumferential compression is analyzed and the methods for evaluating ductility are discussed over the peak strength. Moreover, the relation between the ductility and the width-to-thickness ratio of cylindrical panels is discussed for the seismic design by using the methods for evaluating ductility.

1. まえがき

わが国においては、鋼構造物の耐震設計が不可欠であり、それには、終局強度とともにダクティリティーとタフネスを考慮する必要がある。土木鋼構造物については、これまで終局強度についての研究は数多くなされてきたが、鋼がもとより十分な変形能力を有していると考えられていたので、ダクティリティーやタフネスについてはあまり議論の対象とはならなかった。しかし、実際の現象では、部材の座屈や断面構成薄板要素の局部座屈によって構造物全体として脆性的な破壊につながり、十分な変形を期待できないことが明らかになってきた。鋼構造物の安全性を確保するためには、ダクティリティーの定量的な評価を図り、設計に反映させる必要がある。

鋼構造のダクティリティーに関する研究は建築構造に関連したものが多く、土木構造に関連したものは極めて少ない^{1) 2)}。しかし、近年、鋼製橋脚の耐震設計に関して、精力的な研究がなされるようになってきた。宇佐美ら^{3) 4)}は、箱形断面柱の繰返し載荷実験を行い、その荷重-変位曲線より、強度劣化、剛性低下、エネルギー吸収能力などを検討している。森脇⁵⁾は、L Y鋼またはQ T鋼よりなる溶接組立H形断面梁の耐荷力実験を行い、鋼種の違いによる座屈強度、耐荷力、ダクティリティーの変化を明らかにしている。酒造・事口⁶⁾は、鋼性ラーメン隅角部の崩壊性状とダクティリティーを実験的に明らかにしてい

* 工博 関西大学教授 工学部土木工学科

(〒564 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号)

** 工修 三井造船(株) 鉄構土木事業部技術部

(〒559 大阪市住之江区芝谷1丁目2番32号)

*** 関西大学大学院 博士課程前期課程

(〒564 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号)

る。渡邊ら⁷⁾は、補剛R付き箱形断面短梁一柱の載荷実験を行い、箱形断面コーナー部に丸みを持たせることによって、ダクティリティーがいかに改善されるかを検討している。土木鋼構造のダクティリティーに関する研究の多くは、部材を対象とした実験的研究であり、直線あるいは曲線部材の構成要素である板要素や円筒パネル要素のダクティリティーについては十分に解明されているとはいえない。また、ダクティリティーが問題となるのは地震荷重等の繰り返し荷重が作用する場合であるが、繰り返し荷重下でのダクティリティーについて議論する前に、まず単調増加荷重のもとでのダクティリティーが十分に検討されていることが望ましい。そのためには終局強度を越えた領域（劣化域）における挙動を正確に捉える必要がある。

三上・辻⁸⁾は、円周方向面内圧縮力を受け、初期たわみと残留応力を有する円筒パネルをとりあげ、動的緩和法(Dynamic Relaxation Method)を用いて弾塑性有限変位解析を劣化域まで行っている。本論文では、その解析法⁸⁾を用いて、板要素や円筒パネル要素の劣化域に渡る挙動を詳細に調べ、種々の評価パラメータを考えて単調増加荷重のもとでのダクティリティーを評価する方法を検討する。評価方法は、設計に用いることを考慮すると、簡単で、できるだけ正確なものが望ましい。そこで、終局強度までの範囲について種々の評価パラメータを考えて、劣化域に渡る挙動を評価する方法を検討する。また、現行の設計基準におけるダクティリティーを考慮した板要素の限界幅厚比が期待しているダクティリティーを検討し、それより得られた知見を発展させて、ダクティリティーを考慮した円筒パネルの限界幅厚比を検討する。

2. 弾塑性有限変位解析

2.1 円筒パネル

本論文の対象モデルは、図-1に示すように弧に沿った長さ a 、幅 b 、厚さ h 、中央面の曲率半径 R で、周辺単純支持された鋼円筒パネルである。パネルは等方性・完全弾塑性材料（降伏応力 σ_y 、Young 率 E 、Poisson 比 ν ）より成る。座標軸は図-1のように設定し、 x 、 y 、 z 方向のそれぞれの変位を u 、 v 、 w とする。荷重としては直線辺に一律な強制変位 v_m を与え、それにより面内応力 σ_y^m を作用させる。

パネルは、初期たわみ w_0 および残留応力 σ_r を有する。初期たわみは母線方向および円周方向に1半波とし、次式で与える。

$$w_0 = w_{0\max} \cdot \cos(\pi x/b) \cdot \cos(\pi y/a) \quad (1)$$

残留応力は円周方向(y 軸方向)のもののみを考え、板厚方向(z 軸方向)に一定とし、図-2の残留応力分布を仮定する。ここに、 σ_{rt} は引張残留応力、 σ_{rc} は圧縮残留応力である。

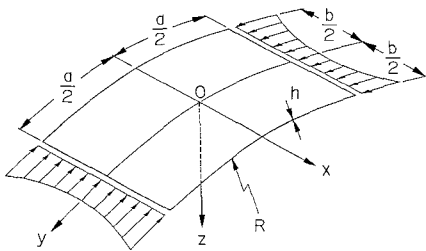


図-1 解析モデル

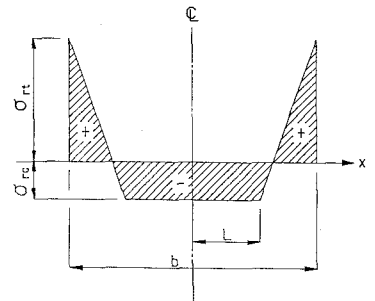


図-2 残留応力分布

2.2 解析法

解析は、対称性を考慮してパネルの $\frac{1}{4}$ 領域について、差分表示を用いた動的緩和法によって行った⁸⁾。差分法を適用するため、このパネルの $\frac{1}{4}$ 領域をx方向に8分割、y方向に8分割、z方向に8分割する。

数値計算は、 $\sigma_Y = 2400 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\nu = 0.3$ 、 $\sigma_{rt} = \sigma_Y$ 、 $\sigma_{rc} = -0.3\sigma_Y$ に対して行った。

2.3 無次元量

数値計算の便宜上、次に示す無次元量を用いる。

$$\begin{aligned} \alpha &= a/b, & \beta &= b/h, & Z &= b^2/hR, & \bar{\sigma} &= \sigma/\sigma_Y, \\ \bar{u} &= ub/h^2, & \bar{v} &= vb/h^2, & \bar{w} &= w/h, \\ \hat{Z} &= b/R, & \hat{w} &= w/b, & \hat{v} &= v/b \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、円筒パネルの幅 b を一定と考えれば、 $\hat{w}$ および $\hat{v}$ を用いて、曲率および幅厚比の異なる円筒パネルの面外および面内変位を比較することができる。また、 $\hat{Z}$ は曲率が円筒パネルのダクティリティに与える影響を評価するために導入した無次元量である。

また、換算幅厚比 λ を $k=4$ に対して次式で求めて、後の図表に用いる。

$$\lambda = (b/h) \sqrt{(\sigma_Y/E) \cdot 12(1-\nu^2)/(\pi^2 k)} \quad (3)$$

2.4 円筒パネルの挙動

ダクティリティを評価する前に、板と円筒パネルの挙動および終局強度と初期降伏強度の関係を検討しておく。以下に示す応力-変位曲線では、初期降伏状態が○、終局強度状態が△、強度が劣化域において初期降伏強度まで低下した状態（以下、劣化限界状態とよぶ）が□で示されている。有限の荷重増分を用いて荷重を増加させているので、初期降伏状態は、最初に塑性化が生じた荷重段階を明示した。そのため、若干の誤差がある。また、図-3に示すように、初期降伏状態の変位と強度を d_f と σ_f 、終局強度状態の変位と強度を d_u と σ_u 、劣化限界状態の変位を d_i' とする。

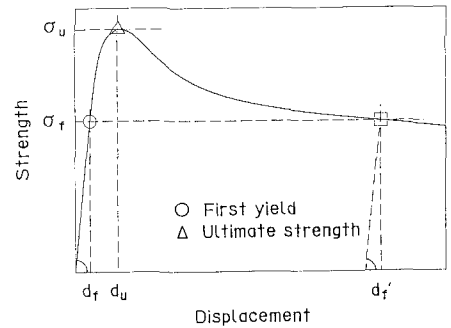


図-3 応力-変位曲線

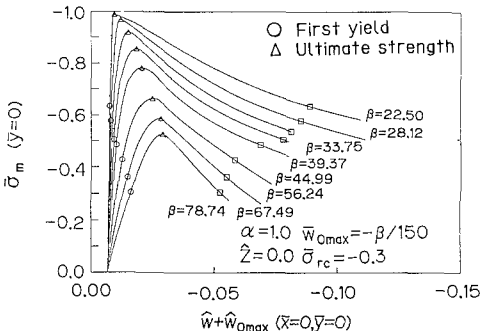


図-4 応力-たわみ曲線

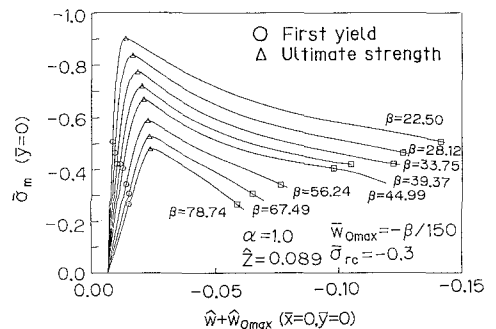


図-5 応力-たわみ曲線

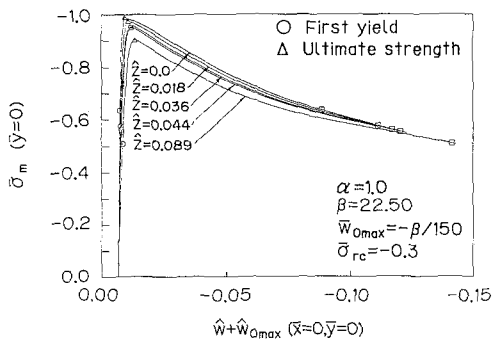


図-6 応力-たわみ曲線

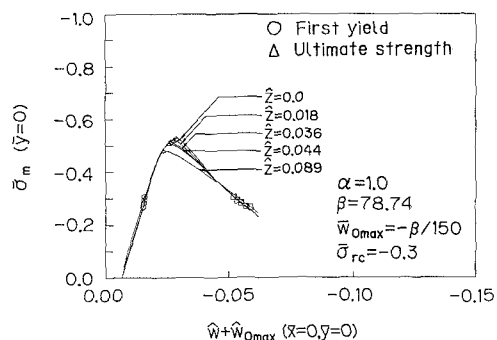


図-7 応力-たわみ曲線

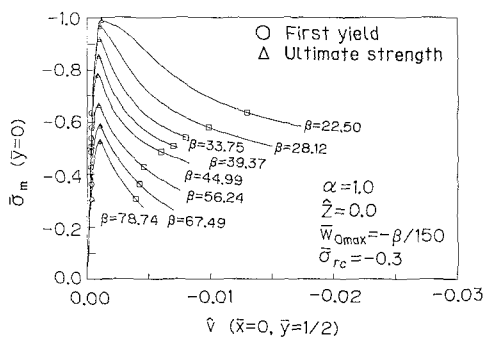


図-8 応力-円周方向面内変位曲線

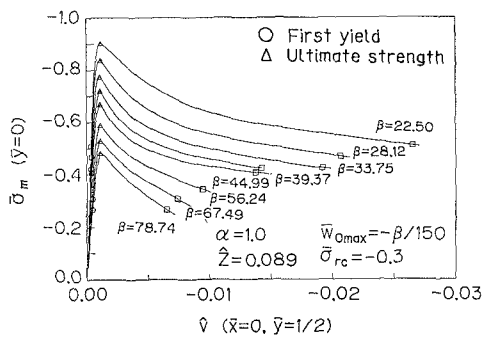


図-9 応力-円周方向面内変位曲線

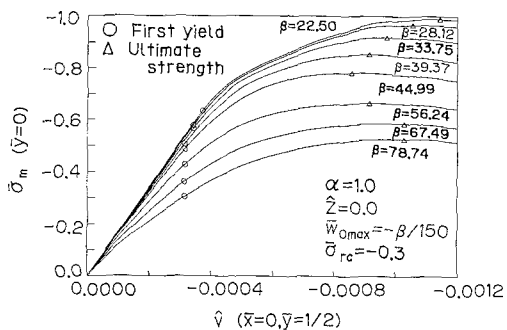


図-10 応力-円周方向面内変位曲線

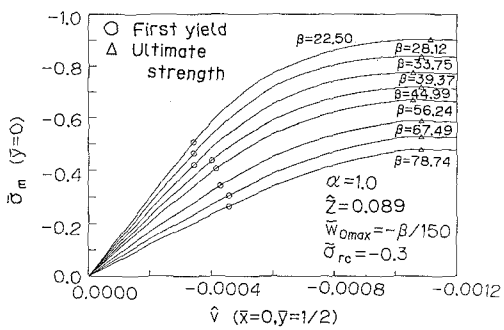


図-11 応力-円周方向面内変位曲線

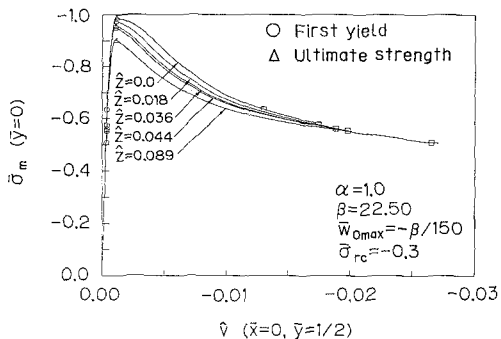


図-12 応力-円周方向面内変位曲線

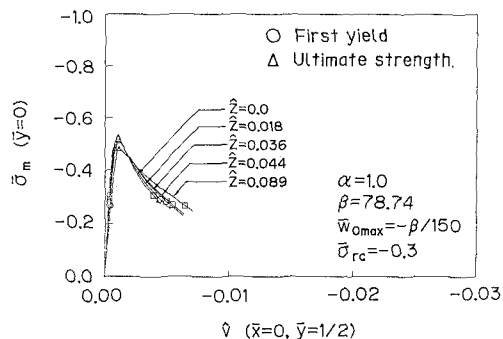


図-13 応力-円周方向面内変位曲線

(1) 応力-たわみ曲線

縦横比 $\alpha = 1.0$, 曲率 $\hat{z} = 0.0$, 最大初期たわみ $\bar{w}_{0\max} = -\beta/150$ の場合と, $\alpha = 1.0$, $\hat{z} = 0.089$, $\bar{w}_{0\max} = -\beta/150$ の場合の, $\bar{y} = 0$ における平均円周方向面内応力とパネル中央点 ($\bar{x} = \bar{y} = 0$) におけるたわみとの関係をそれぞれ図-4 および図-5 に示す. また, $\alpha = 1.0$, $\beta = 22.50$, $\bar{w}_{0\max} = -\beta/150$ の場合と, $\alpha = 1.0$, $\beta = 78.74$, $\bar{w}_{0\max} = -\beta/150$ の場合の, 同じ応力とたわみの関係をそれぞれ図-6 および図-7 に示す.

これらの図から次のことがわかる.

- ①初期降伏強度および終局強度は, 板厚が増す (幅厚比 β が小さく) と大きくなり, 曲率が増すと小さくなる.
- ②初期降伏状態および終局強度状態のたわみは, 板厚が増すと小さくなる.
- ③劣化限界状態のたわみは, 板厚が増すと大きくなり, 曲率が増すと大きくなる.

(2) 応力-円周方向面内変位曲線

$\alpha = 1.0$, $\hat{z} = 0.0$, $\bar{w}_{0\max} = -\beta/150$ の場合と, $\alpha = 1.0$, $\hat{z} = 0.089$, $\bar{w}_{0\max} = -\beta/150$ の場合の, $\bar{y} = 0$ における平均円周方向面内応力とパネル直線端 ($\bar{y} = 1/2$) における円周方向面内変位との関係をそれぞれ図-8 および図-9 に示す. これらの図の終局強度状態までを拡大すると, それぞれ図-10, 図-11 のようになる. また, $\alpha = 1.0$, $\beta = 22.50$, $\bar{w}_{0\max} = -\beta/150$ の場合と, $\alpha = 1.0$, $\beta = 78.74$, $\bar{w}_{0\max} = -\beta/150$ の場合の, 同じ応力と円周方向面内変位の関係をそれぞれ図-12 および図-13 に示す.

これらの図から次のことがわかる.

- ①初期降伏状態に達する円周方向面内変位は, 曲率が大きい場合, 幅厚比によって若干変化するが, 曲率が減るとこの傾向は小さくなり, 幅厚比の影響を受けずほぼ一定の値とみなせる.
- ②終局強度状態に達する円周方向面内変位は, 曲率が小さい場合, $\beta = 44.99$ 付近で最小になるが, 曲率が増すとこの傾向は小さくなり, 幅厚比の影響を受けずほぼ一定の値とみなせる.
- ③劣化限界状態に達する円周方向面内変位は, 板厚が増すと大きくなり, 曲率が増すと大きくなる.

ここで, 図-8, 9, 12 および 13 からわかるように, 初期降伏状態および終局強度状態に達する円周方向面内変位は, 劣化限界状態に達する円周方向面内変位に比べて非常に小さい. したがって, 劣化限界状態に渡る円筒パネルの挙動を検討する場合には, ①および②の傾向を無視し, 初期降伏状態および終局強度状態に達する円周方向面内変位は幅厚比および曲率の影響を受けないと見なしても差し支えない.

(3) 強度の比 σ_u/σ_f

$\alpha = 1.0$, $\bar{w}_{0\max} = -\beta/150$ の場合について, 強度比 σ_u/σ_f と換算幅厚比 λ との関係を図示すると図-14 のようになる. また, σ_u/σ_f と曲率 $\hat{z}$ との関係を図示すると図-15 が得られる.

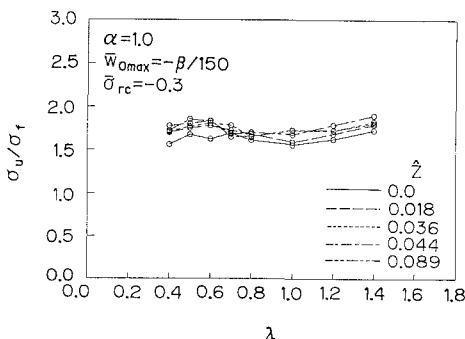


図-14 強度比 σ_u/σ_f と λ の関係

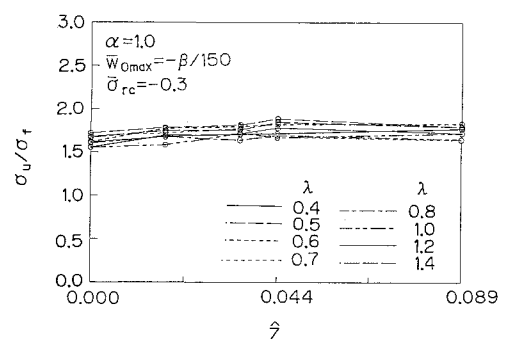


図-15 強度比 σ_u/σ_f と $\hat{z}$ の関係

これらの図において、強度比は曲率や板厚の影響をほとんど受けないので、 $\sigma_u/\sigma_f \approx 1.7$ とみなしてよい。

3. 円筒パネルのタフネスとダクティリティー

部材の構成要素に要求される力学的特性は、それが破壊に至るまでに十分な強度とダクティリティーを発揮すること、すなわち、十分なタフネスを有することである。強度が高くてもダクティリティーの低い要素と、ダクティリティーが高くても強度の低い要素が、同程度のタフネスを有する場合があるので、構成要素のこれら3つの力学的特性は個別に検討する必要がある。

材料のタフネスは破壊を起こすのに要する単位体積当りの仕事の目安であり、単純な引張試験では応力-ひずみ曲線の下側の面積で表される⁹⁾。ここでは、破壊点として前述の劣化限界状態を考える。また、円筒パネルは円周方向面内圧縮力を受けているので、平均円周方向面内応力とその共役対である円周方向面内変位の関係において、次の無次元パラメータEによってタフネスを評価する。

$$E = \int \bar{\sigma}_m \, d\bar{\epsilon} \quad (4)$$

無次元パラメータEは、劣化限界点までの平均円周方向面内応力-円周方向面内変位曲線によって囲まれる面積で示される(図-16)。このパラメータによれば、単位幅当たりのエネルギー吸収量を求めることになり、円筒パネルのタフネスに対する幅厚比と曲率の影響を適切に評価できるものと考えられる。

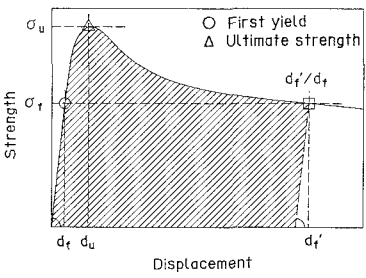


図-16 無次元パラメータE

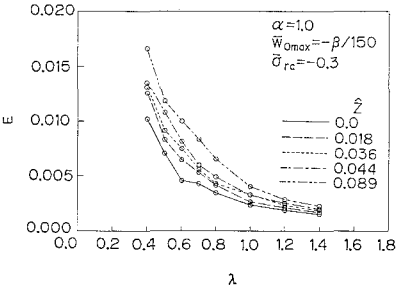


図-17 劣化限界状態までのEとλの関係

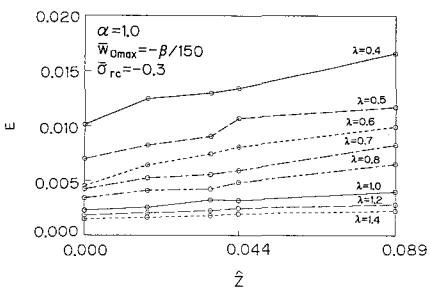


図-18 劣化限界状態までのEとλ̂の関係

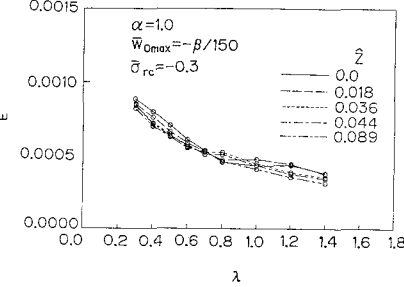


図-19 終局強度状態までのEとλの関係

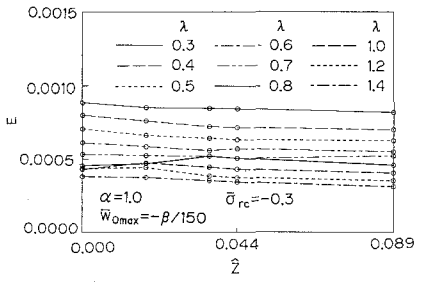


図-20 終局強度状態までのEとλ̂の関係

$\alpha=1.0$, $\bar{w}_{0\max}=-\beta/150$ の場合について、タフネスEと換算幅厚比 λ の関係を図-17に、タフネスEと換算曲率 $\bar{\kappa}$ との関係を図-18に示す。これらの図からわかるように、タフネスは、曲率が増すと大きくなり、この傾向は板厚が厚くなると著しくなる。 $\bar{\kappa}=0.0$ かつ $\lambda\geq 0.6$, $0.018\leq \bar{\kappa}\leq 0.044$ かつ $\lambda\geq 0.8$, $\bar{\kappa}=0.089$ かつ $\lambda\geq 1.0$ の範囲では、タフネスは幅厚比および曲率の影響をほとんど受けず、一定値に漸近する。

次に、終局強度状態までのタフネスEを検討し、劣化限界状態までのEとの相関を調べる。 $\alpha=1.0$, $\bar{w}_{0\max}=-\beta/150$ の場合について、終局強度状態までのタフネスEと換算幅厚比 λ との関係を図-19に、タフネスEと換算曲率 $\bar{\kappa}$ との関係を図-20に示す。これらの図において、終局強度状態までのタフネスに対する曲率の影響はほとんどない。また、劣化限界状態までのタフネスが、 $\lambda<0.6$ の範囲で急激に増大しているのに対して、終局強度状態までのタフネスは、板厚の増加にともなって一定の増分で大きくなるだけである。したがって、終局強度状態までのタフネスと劣化限界状態までのタフネスとの間には相関はない。

タフネス、初期降伏強度、終局強度、劣化限界状態までの円周方向面内変位はいずれも幅厚比が小さくなると大きくなる。また、曲率が大きくなると強度は低下するものの、タフネスと劣化限界状態までの円周方向面内変位は大きくなる。すなわち、幅厚比が小さく曲率の大きい円筒パネルは、曲率の増大に伴う強度の低下はあるものの、劣化限界状態までの円周方向面内変位が大きくなるので、タフネスも大きくなる。

4. 劣化限界状態までの範囲におけるダクティリティーの評価

前章で、幅厚比が小さく曲率の大きい円筒パネルのタフネスは、強度よりも劣化限界状態までの円周方向面内変位の影響を大きく受けることがわかった。したがって、幅厚比が小さく曲率の大きい円筒パネルは、タフネスとともにダクティリティーも大きくなるものと考えられる。しかし、ここで円筒パネルのダクティリティーをどのような尺度で計るかが問題となる。Popov¹⁰⁾は、ダクティリティーのタイプを材料、部材、構造物の3種類に分け、それぞれに対して、ひずみ、回転角、たわみを用いたダクティリティー・ファクターを与えている。ここでは、劣化限界状態までの円筒パネルの挙動を考慮した種々の評価パラメータを考え、ダクティリティーの評価方法を検討する。また、これらのパラメータによって評価されるダクティリティーと前述のタフネスとの相関についても調べる。

4.1 評価パラメータ

円周方向面内圧縮力を受ける板および円筒パネルのダクティリティーを評価するために、平均円周方向面内応力とその共役対である円周方向面内変位の関係において、次のようなパラメータを考える。

(1) 変位の比 v_{fr}/v_f

劣化限界状態の変位 v_{fr} と初期降伏状態の変位 v_f の比を考える。この値が大きくなるにしたがって、塑性変位が弾性変位に比べて大きくなり、ダクティリティーを有していることになる。これは、Popov¹⁰⁾の材料ダクティリティー・ファクターに類似している。

(2) 変位の比 v_{fr}/v_u

終局強度状態を経て劣化限界状態に至る変位の過程を考慮できるパラメータとして、劣化限界状態の変位 v_{fr} と終局強度状態の変位 v_u の比を考える。この値が大きくなるにしたがって、終局強度状態に至るまでの変位に対して、終局強度状態から劣化限界状態までの変位の増分が大きくなり、劣化域においてダクティリティーを有していることになる。

(3) 傾き $I_{u-f'}(v)$

終局強度状態と劣化限界状態の関係を示すものとして、応力-変位曲線における終局強度状態と劣化限界状態を結んだ直線の傾き $I_{u-f'}(v)$ を考える。

$$I_{u-f'}(v) = (\sigma_f - \sigma_u) / (v_{f'} - v_u) \quad (5)$$

このパラメータは終局強度状態から劣化限界状態に至る過程において、応力の低下に比べて変位の増分が大きくなるにしたがって0に近づく。すなわち、劣化域における強度低下とダクティリティーの両方を考慮できるパラメータであると考えられる。

4.2 ダクティリティーの評価

(1) $v_{f'}/v_f$ による評価

$\alpha=1.0$, $\bar{w}_{0max}=-\beta/150$ の場合の, $v_{f'}/v_f$ と λ の関係を図-21に示す。この図において, $v_{f'}/v_f$ の値は曲率が増すと大きくなり, その増加の割合は板厚が厚くなると大きくなる。 $\hat{z}=0.0$ かつ $\lambda \geq 0.6$, $0.018 \leq \hat{z} \leq 0.044$ かつ $\lambda \geq 0.8$, $\hat{z}=0.089$ かつ $\lambda \geq 1.0$ の範囲では, $v_{f'}/v_f$ の値は幅厚比および曲率の影響をほとんど受けず, 一定値13.0に漸近する。これらの傾向は, タフネスの場合(図-17)とよく似ている。

2.4(2)で述べたように初期降伏状態の変位 v_f は, 劣化限界状態における変位 $v_{f'}$ に比べて非常に小さく, 幅厚比および曲率に関わらずほぼ一定値になると見なしてよい。したがって, $v_{f'}/v_f$ と幅厚比および曲率の関係は, 劣化限界状態における変位 $v_{f'}$ と幅厚比および曲率の関係とはほぼ同様の傾向を示す。また, 2.4(3)で述べたように強度比 σ_u/σ_f が一定値をとることから, 終局強度状態から劣化限界状態に至るまでの強度低下分の終局強度に対する割合が, 幅厚比および曲率の影響を受けないことが保証される。したがって, パラメータ $v_{f'}/v_u$ は幅厚比や曲率の異なる円筒パネルの劣化限界状態に至るまでの変位の過程, すなわち, ダクティリティーを最も適切に評価できるものと考えられる。

(2) $v_{f'}/v_u$ による評価

$\alpha=1.0$, $\bar{w}_{0max}=-\beta/150$ の場合の, $v_{f'}/v_u$ と λ の関係を図-22に示す。この図は図-21とほぼ同様の傾向を示しているが, 幅厚比が大きい範囲において, 曲率の大きな円筒パネルほど $v_{f'}/v_u$ の値が大きくなるという若干の相違が見られる。このパラメータは, 終局強度状態を経て劣化限界状態に至る変位の過程の違いを考慮できるものであるが, 幅厚比が小さいとき, 劣化限界状態までの変位 $v_{f'}$ に比べて終局強度状態までの変位 v

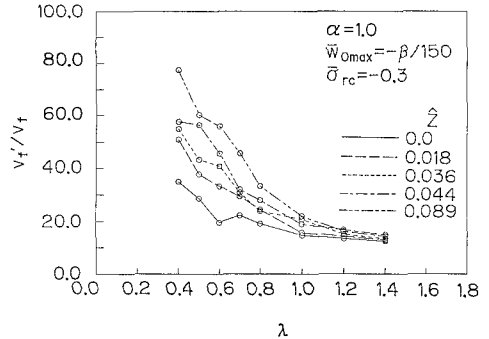


図-21 変位比 $v_{f'}/v_f$ と λ の関係

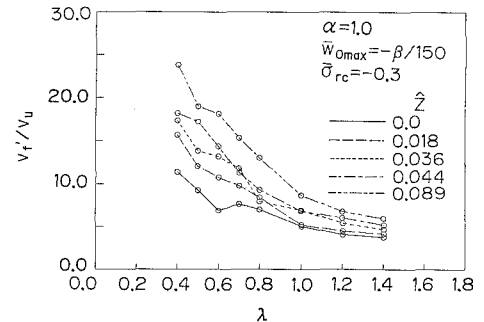


図-22 変位比 $v_{f'}/v_u$ と λ の関係

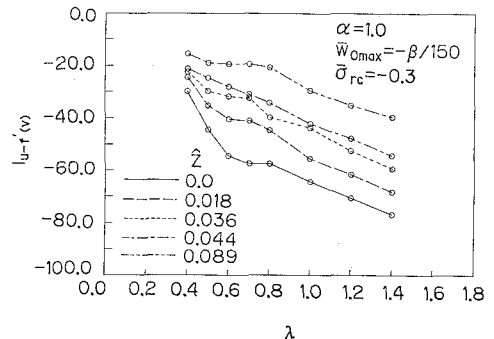


図-23 傾き $I_{u-f'}(v)$ と λ の関係

v_u は非常に小さく、 v_u は幅厚比および曲率に関わらずほぼ一定値と見なされ、 v_{fr}/v_u と幅厚比および曲率の関係は、 v_{fr} と幅厚比および曲率の関係とほぼ同様の傾向を示すことになる。一方、幅厚比が大きいとき、 $v_{fr} \gg v_u$ が成立せず、幅厚比および曲率の変化による v_u の値の変化は無視できない。このため、幅厚比が大きい範囲において、図-21と図-22の間に若干差が生じたものと考えられる。

したがって、このパラメータは、曲率に応じて適用できる幅厚比の上限を制限すれば、円筒パネルのダクティリティーの評価に用いることができる。

(3) $I_{u-fr}(v)$ による評価

$\alpha=1.0$ 、 $w_{0max}=-\beta/150$ の場合の、 $I_{u-fr}(v)$ と λ の関係を図-23に示す。この図から、 $I_{u-fr}(v)$ の値は、板厚または曲率が増すと0に近づくことがわかる。この値が0に近づくにしたがって、応力-変位曲線が劣化域において水平に近くなる。終局強度状態から劣化限界状態に至るまでの強度低下の絶対量は、幅厚比および曲率が大きくなると小さくなる。また、終局強度状態から劣化限界状態に至るまでの変位の増分は、前述の v_{fr}/v_u からもわかるように、板厚および曲率が大きくなると大きくなる。したがって、このパラメータを用いて、幅厚比および曲率の異なる円筒パネルのダクティリティーのみを評価することはできない。

(4) 評価のまとめ

円周方向面内力を受ける円筒パネルは、強度比 σ_u/σ_f と、初期降伏状態における円周方向面内変位とが板厚や曲率の影響を受けずほぼ一定値をとるという独特の挙動を示す。一方、終局強度および劣化限界状態に至るまでの塑性変位は、板厚および曲率によって異なる。このため、 v_{fr}/v_f がダクティリティーの評価パラメータとして最も適したものとなる。また、このパラメータから、前述のタフネスEを推定することもできる。

5. 終局強度状態までの範囲におけるダクティリティーの評価

前章で検討した評価パラメータのうち、円筒パネルのダクティリティーを最も適切に評価できるのは v_{fr}/v_f であった。しかし、この評価パラメータの値を得るには、正確な荷重-変位曲線を劣化域まで解析する必要がある。ダクティリティーの評価方法は設計に用いることを考慮すると、正確であることはもちろんのこと、なるべく取り扱いが簡単なものがよい。そこで、終局強度までの範囲で種々の評価パラメータを考えて、劣化域にわたる全般的なダクティリティーを評価できる方法を検討する。

5.1 評価パラメータ

ダクティリティーを評価するためのパラメータとして次のものを考える。

(1) 変位の比 v_u/v_f

終局強度状態の変位 v_u と初期降伏状態の変位 v_f の比を考える。この値が大きくなるにしたがって、終局強度までの塑性変位が弾性変位に対して大きくなる。

(2) 傾き $I_{f-u}(v)$

初期降伏状態と終局強度状態の関係を示すものとして、応力-変位曲線における初期降伏点と終局強度点を結んだ直線の傾き $I_{f-u}(v)$ を考える。

$$\begin{aligned} I_{f-u}(v) &= (\sigma_u - \sigma_f) / (v_u - v_f) \\ &= (\sigma_f / v_f) \cdot \{ (\sigma_u / \sigma_f - 1) / (v_u / v_f - 1) \} \end{aligned} \quad (6)$$

このパラメータは、塑性域における強度の増分 $(\sigma_u - \sigma_f)$ が大きくなるほど値が大きくなり、終局強度

までの変位の増分 ($v_u - v_f$) が大きくなるほど値が小さくなる。

(3) 傾きの比 $I_{f-u}(v)$

初期状態から初期降伏状態までと、初期降伏状態から終局強度状態までとの応力-変位曲線の変化を比較するために、傾き $I_{f-u}(v)$ と初期剛性 $I_{0-f}(v)$ との比 $I_{f-u}(v)$ を考える。

$$\begin{aligned} I_{f-u}(v) &= I_{f-u}(v) / (\sigma_f / v_f) \\ &= (\sigma_u / \sigma_f - 1) / (v_u / v_f - 1) \end{aligned} \quad (7)$$

このパラメータは、強度の比 σ_u / σ_f が大きくなるほど値が大きくなり、変位の比 v_u / v_f が大きくなるほど値が小さくなる。すなわち、傾きの比 $I_{f-u}(v)$ は、強度比と変位比の両方を考慮できるパラメータであると考えられる。

5.2 ダクティリティーの評価

$\alpha=1.0$, $\bar{w}_{0max} = -\beta/150$ の場合の、 v_u / v_f と λ の関係、 $I_{f-u}(v)$ と λ の関係、 $I_{f-u}(v)$ と λ の関係をそれぞれ、図-24~26に示す。図-24において、 v_u / v_f の値は板厚や曲率の影響をほとんど受けず近似的に3.0とみなすことができる。しかし、その他の評価パラメータを用いた場合は、板厚や曲率の影響の明確な傾向がつかめない。これは、強度比 σ_u / σ_f と、初期降伏状態における円周方向面内変位が板厚や曲率の影響を受けずほぼ一定値をとり、強度のみが幅厚比や曲率によって異なるためである。したがって、円周方向面内圧縮力を受ける円筒パネルについては、終局強度状態までの挙動から劣化限界状態までのダクティリティーを推定することはできない。

6. ダクティリティーを考慮した幅厚比の検討

6.1 現行設計基準におけるダクティリティーの規定

AISC-LRFD¹¹⁾、EC No.8¹²⁾ および日本建築学会限界状態設計法指針 (AIJ-LSD)¹³⁾ では、周辺単純支持された圧縮板の限界幅厚比を、この板要素によって構成されるI型断面柱などの耐震部材が十分な変形能力あるいは回転容量を確保するように規定している。この3つの設計基準の中で、EC No.8が最も厳しい限界幅厚比を次のように規定している。

$$\beta = 33 \sqrt{235 / \sigma_Y} \quad (8)$$

式(8)の σ_Y の単位は MPa であるので、 $\sigma_Y = 2400 \text{ kgf/cm}^2$ に対して計算すると $\beta = 33$ ($\lambda = 0.59$) となる。この限界幅厚比が板要素に対してどのようなダクティリテ

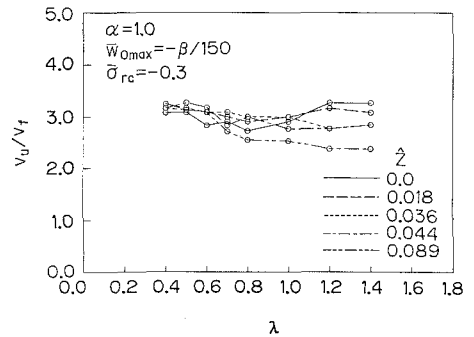


図-24 変位比 v_u / v_f と λ の関係

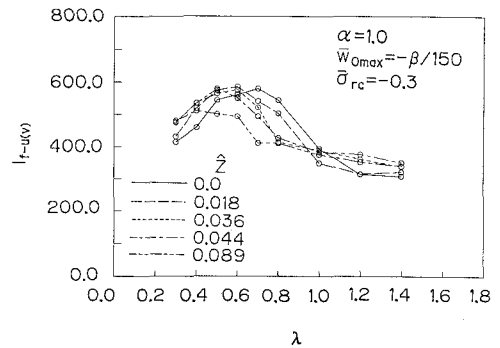


図-25 傾き $I_{f-u}(v)$ と λ の関係

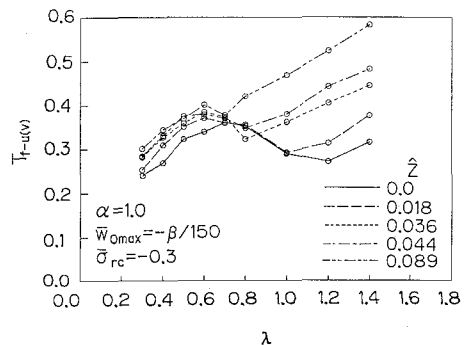


図-26 傾き比 $I_{f-u}(v)$ と λ の関係

ィーを期待するものであるかを、前述のダクティリティー評価パラメータを用いて検討する。さらに、この知見を発展させて、ダクティリティーを考慮した円筒パネルの限界幅厚比を検討する。

6.2 板要素の幅厚比

限界幅厚比 $\lambda=0.59$ が板要素($\hat{z}=0.0$)に要求するダクティリティーを、4.1で述べた評価パラメータ v_{fr}/v_f を用いて検討する。このパラメータは、ダクティリティーとタフネスを同時に評価できるパラメータである。このパラメータ(図-21)によると、限界幅厚比 $\lambda=0.59$ は、I型断面柱の腹板などの板要素に対して、劣化限界状態までに初期降伏強度状態の円周方向面内変位の20倍以上の円周方向面内変位を生じ得ることを要求するものであると考えられる。このとき、タフネスEは、図-17からわかるように0.005以上になる。

6.3 円筒パネルの幅厚比

円筒パネルの限界幅厚比を検討する。板要素の限界幅厚比 $\lambda=0.59$ に対するタフネスEおよびダクティリティー v_{fr}/v_f と同じ値を有する円筒パネルの限界幅厚比 λ は、図-17、21からわかるように、曲率 $\hat{z}$ が増加すれば、大きくてもよい。

ところで、円筒パネルでは曲率 $\hat{z}$ が増加すると終局強度 $\bar{\sigma}_m$ が低下する。さらに、 $\lambda=0$ に対する終局強度の上限値 Ψ も、曲率 $\hat{z}$ が増加すると低下する¹⁸⁾。したがって、ここでは、板要素と同程度以上のダクティリティーと、上限値 Ψ と同程度の高い終局強度 $\bar{\sigma}_m$ を確保できるような、円筒パネルの限界幅厚比 λ について考える。

円筒パネルの場合、面外たわみが増加すると有効幅が減少し、平均円周方向面内応力が小さくなる。すなわち、強度の低下はたわみで捉えることができる。このことに注目して、パネル中央点のたわみ $\hat{w}$ に対する5.1のパラメータ3種をとりあげる。すなわち、3種類の評価パラメータ(1)変位の比、(2)傾き、(3)傾きの比をそれぞれ w_u/w_f 、 $I_{f-u}(w)$ 、 $\bar{I}_{f-u}(w)$ と表す。

$\alpha=1.0$ 、 $\bar{w}_{0max}=-\beta/150$ の場合について、パラメータ w_u/w_f 、 $I_{f-u}(w)$ 、 $\bar{I}_{f-u}(w)$ と λ の関係を示すと、それぞれ図-27～29のようになる。図中には、EC No.8における板要素の限界幅厚比 $\lambda=0.59$ を二点鎖線で示している。図-29において、板要素の限界幅厚比 $\lambda=0.6$ 付近で $\bar{I}_{f-u}(w)$ が極小値をとることがわかる。この極小値を与える λ を λ_{min} で表すことにすると、 λ_{min} は曲率 $\hat{z}$ が増加すると小さくなる。すなわち、 λ_{min} が、板要素と同程度以上のダクティリティーと、上限値 Ψ と同程度の高い終局強度 $\bar{\sigma}_m$ を確保できるような、円筒パネルの限界幅厚比 λ に相当するものと思われる。これを以下

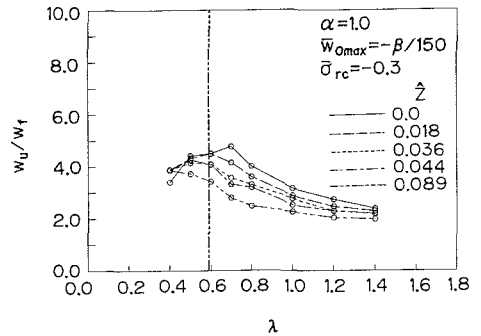


図-27 たわみ比 w_u/w_f と λ の関係

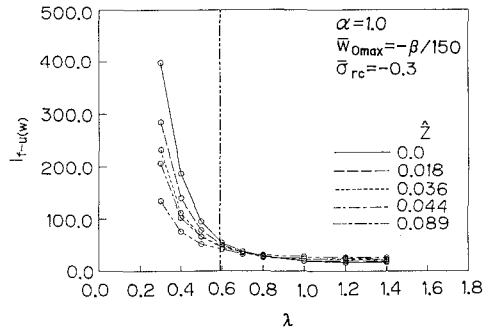


図-28 傾き $I_{f-u}(w)$ と λ の関係

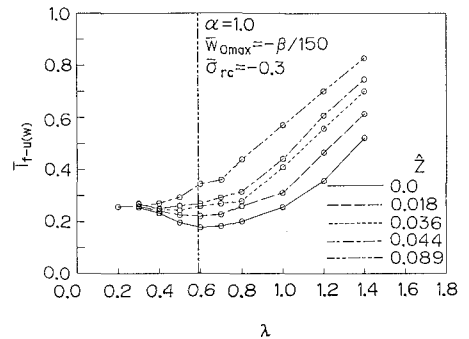


図-29 傾き比 $\bar{I}_{f-u}(w)$ と λ の関係

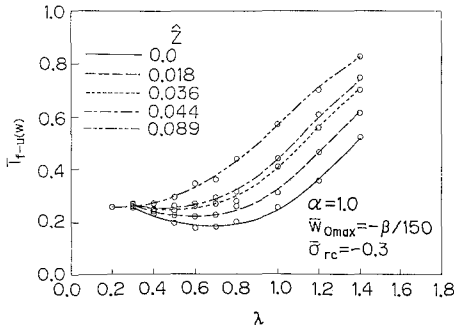


図-30 ニューラルネットワークによる傾き比 $T_{f-u}(w)$ の推定

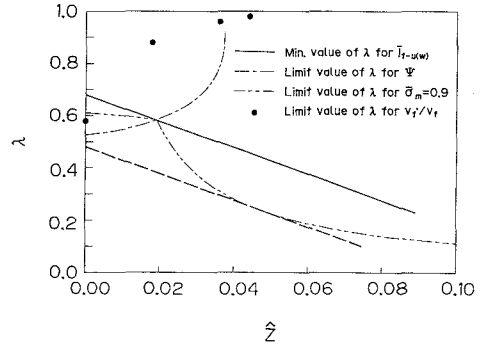


図-31 円筒パネルの限界幅厚比

において，検討する。

6.4 ニューラルネットワークを用いた円筒パネルの限界幅厚比の推定

種々の $\hat{Z}$ および λ に対して数値計算を行い，その結果より $T_{f-u}(w)$ を求め，それから種々の曲率を持つ円筒パネルに対して λ_{min} を定めるには膨大な計算時間を要する．そこで，数値計算を行っていない $\hat{Z}$ および λ に対する $T_{f-u}(w)$ の値を，ニューラルネットワーク¹⁴⁾ を適用して補間する¹⁵⁾ ことを考える．すなわち，数値計算の結果として得られた $\hat{Z}$ ， λ ， $T_{f-u}(w)$ を用いて，ニューラルネットワークを構築し，任意の $\hat{Z}$ および λ から $T_{f-u}(w)$ を推定する．

ハードウェアとしてニューロボード FPM60-191 を装着した FMR-70HL1 を，ソフトウェアとして NEUROSIM/L¹⁶⁾ を用いる．図-29 からわかるように，この問題は非線形性が強いので，4 層の階層型ニューラルネットワークを用いた．ネットワークの入力層のユニット数は入力要因 ($\hat{Z}$ ， λ) の数である 2 個，出力層のユニット数は出力要因 ($T_{f-u}(w)$) の数である 1 個とした．学習データ ($\hat{Z}$ ， λ ， $T_{f-u}(w)$) は数値計算結果より得られた図-29 に示す 46 組であり， $\hat{Z} = [0.0, 0.2]$ ， $\lambda = [0.0, 1.4]$ をそれぞれ $[0, 1]$ に正規化した．学習方法として逆伝播法を用いるので，学習パラメータ (ϵ ， α ， β)¹⁶⁾ を 0 以外の値に設定する．中間層のユニット数は，出力結果の精度および妥当性に大きな影響を与えるので，数値計算結果から得られた $\hat{Z}$ および λ に対する $T_{f-u}(w)$ とニューラルネットワークより得られた結果を比較・検討し，第 2 層，第 3 層ともに 8 個とした．学習パラメータについても同様の検討を行い，(ϵ ， α ， β) = (5, 0.4, 0) とした．学習は 20000 回以上，平均二乗誤差が 0.0001 未満となるまで行った．

図-29 に対応するニューラルネットワークによる $T_{f-u}(w)$ - λ 曲線を求めると，図-30 のようになる．種々の $\hat{Z}$ に対する λ_{min} を求めると，図-31 の実線が得られる．この図において，板要素 ($\hat{Z} = 0$) に対する λ_{min} は 0.68 であり，EC No. 8 における限界幅厚比 $\lambda = 0.59$ より大きく，道路橋示方書¹⁷⁾ における限界幅厚比 $\lambda = 0.7$ に近い．また，円筒パネル要素 ($\hat{Z} \neq 0$) に対する λ_{min} は，曲率 $\hat{Z}$ の増加に比例して小さくなる．

三上ら¹⁸⁾ は最大初期たわみ $w_{0max} = -\beta/150$ と圧縮残留応力 $\sigma_{rc} = -0.3$ を有する円筒パネルの終局強度 σ_m および $\lambda = 0$ に対する終局強度の上限値 Ψ を次式で与えている．

$$\sigma_m = \Psi \{ 0.526 / (\Psi \lambda) \}^{0.7} \leq \Psi \quad (9)$$

$$\Psi = 1 - Z^{1.3} (1 - \nu^2) / 5 \quad (10)$$

式(9), (10)より, 終局強度の上限値 Ψ を確保できる $\hat{\lambda}$ と λ の関係を求めると, 図-31の一点鎖線のようになる。しかし, この $\hat{\lambda}$ と λ の関係では, 終局強度 $\bar{\sigma}_m$ は $\hat{\lambda}$ の増加とともに低下することになる。そこで, 式(9), (10)より, 終局強度 $\bar{\sigma}_m=0.9$ を確保できる $\hat{\lambda}$ と λ の関係を求めると, 図-31の二点鎖線のようになる。さらに, 図-21より, $\lambda=0.59$ と同程度のダクティリティー評価パラメータ v_{t1}/v_t を有する円筒パネルの限界幅厚比 λ を求めると, 図-31の●印のようになる。

図-31において, λ_{min} (実線)を満足する円筒パネルは, 板要素と同程度以上のダクティリティーを確保できるものの, 終局強度 $\bar{\sigma}_m=0.9$ を確保できない。そこで, 終局強度について Ψ または $\bar{\sigma}_m=0.9$ を確保できるように, 実線を平行移動して破線を得る。破線で示される幅厚比 λ_{min} を満足する円筒パネルの強度は, $0.0 \leq \hat{\lambda} \leq 0.019$ のとき上限値 Ψ であり, $\hat{\lambda} \geq 0.019$ のとき $\bar{\sigma}_m=0.9$ である。ダクティリティーは, $\hat{\lambda}$ の増加に比例して板要素のそれより大きくなる。したがって, 図-31の破線が, 円筒パネルの限界幅厚比を与えるものであると考えられる。

7. あとがき

種々の幅厚比および曲率を有する周辺単純支持された正方形の円筒パネルが円周方向面内圧縮力を受ける場合について, 劣化域にわたる挙動を詳細に調べ, これらを考慮した種々の評価パラメータを考えてダクティリティーを評価する方法を検討した。その結果, 平均円周方向面内応力-円周方向面内変位曲線において, 劣化限界状態の変位と初期降伏状態の変位の比を調べることにより, 円筒パネルのダクティリティーを評価できることがわかった。これは, 円筒パネルの劣化域にわたる挙動において, 初期降伏強度と終局強度の比と, 初期降伏状態における円周方向面内変位とが板厚や曲率の影響を受けずほぼ一定値となるためである。

また, このダクティリティー評価パラメータを用いて, 現行設計基準におけるダクティリティーを考慮した板要素の限界幅厚比が期待しているダクティリティーを検討し, それより得られた知見を発展させて, ダクティリティーを考慮した円筒パネルの限界幅厚比を検討した。

なお, 数値計算には, 関西大学情報処理センターのスーパーコンピュータFACOM VP-2100/10ならびにVP-50Bを用いた。解析結果の処理にはFACOM M-780/10のアプリケーションソフトGRAPHMANを使用した。

本研究は, 平成3年度文部省科学研究費総合研究(A)(代表者 山田善一)の補助を受けた。また, 平成元~2年度土木学会関西支部「鋼構造物のダクティリティー評価に関する調査研究グループ」(代表者: 京都大学教授 渡邊英一氏)の各委員から討議を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鋼構造物のダクティリティー評価に関する研究グループ: 鋼構造物のダクティリティー評価に関する調査研究, 土木学会関西支部共同研究グループ中間報告書, 1990. 6.
- 2) 鋼構造物のダクティリティー評価に関する研究グループ: 鋼構造物のダクティリティー評価に関する調査研究, 土木学会関西支部共同研究グループ最終報告書, 1991. 6.
- 3) 宇佐美勉・今井康幸・青木徹彦・伊藤義人: 繰り返し荷重を受ける鋼圧縮部材の強度と変形能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 37A, pp. 93-106, 1991. 3.
- 4) 宇佐美勉・水谷慎吾・青木徹彦・伊藤義人・安波博道: 補剛箱形断面鋼圧縮部材の繰り返し弾塑性挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 38A, pp. 105-117, 1992. 3.
- 5) 森脇良一: 降伏比の異なる60キロ級高張力鋼による溶接組立梁の極限強度と変形性能について, 構造

- 工学論文集, Vol.37A, pp.155-166, 1991.3.
- 6) 酒造敏廣・事口寿男：鋼製ラーメン隅角部の崩壊性状と変形性能に関する実験的研究，構造工学論文集, Vol.37A, pp.121-134, 1991.3.
 - 7) 渡邊英一・杉浦邦征・森忠彦・鈴木巖：補剛R付き箱型断面短はり一柱の強度と変形性能，構造工学論文集, Vol.38A, pp.143-154, 1992.3.
 - 8) 三上市藏・辻省悟：終局強度を超えた円筒パネルの弾塑性有限変位挙動の解析，構造工学論文集，土木学会, Vol.37A, pp.287-298, 1991.3.
 - 9) 梅村魁・大澤胖・村田義男：鋼構造の耐震設計，オーム社，1984.
 - 10) Popov, E. P. : SEISMIC BEHAVIOR OF STRUCTURAL SUBASSEMBLAGES, JOURNAL OF THE STRUCTURAL DIVISION, ASCE, Vol.107, No.ST7, pp.1451-1474, 1980.
 - 11) AISC : LRFD Load & resistance factor design, Specification, for structural steel buildings, 1986.
 - 12) Eurocode No.8 : Structures in seismic region, CEC, 1988.
 - 13) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計基準（案），1990.
 - 14) 麻生英樹：ニューラルネットワーク情報処理，産業図書，1989.
 - 15) 矢川元基：ニューラルネットワークと計算力学，日本機械学会論文集, Vol.57, No.541, pp.37-44, 1991.9.
 - 16) NEUROSIM/L使用者の手引，富士通㈱
 - 17) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1990.2.
 - 18) 三上市藏・松本浩徳・辻省悟・田中克弘：初期不整を有する円筒パネルの圧縮強度，構造工学論文集，土木学会, Vol.36A, pp.217-228, 1990.3.

（1992年9月21日受付）