(昭和62年5月 日本造船学会春季講演会において講演)

構造要素の衝突圧壊強度に関する基礎的研究

(その3) 軸荷重を受ける角型鋼管の圧壊実験と有限要素解析

正員都井裕* 正員弓削康平** 正員小畑和彦*

Basic Studies on the Crashworthiness of Structural Elements (Part 3) Crush tests of square tubes under axial loading and finite element analysis

> by Yutaka Toi, Member Kohei Yuge, Member Kazuhiko Obata, Member

Summary

The crush tests for seven specimens of square tubes under axial compression are carried out, whose results are compared with the existing theoretical solutions and the empirical formulas with respect to the buckling load, the wavelength of the crushing mode and the mean crushing load. And also the finite element analysis is conducted by using the code developed in the previous report. The obtained results can be summarized as follows:

(1) As for the buckling load the existing theoretical as well as the finite element solutions agree well with the experimental results.

(2) As for the crushing wavelength the theoretical prediction fails, however, the finite element solutions which minimize the buckling loads are in quantitatively good agreement with the experimental values. The theoretical values given by Wierzbicki which minimize the rigid-plastic solutions for the mean crushing stresses also agree well with the experimental results.

(3) As for the mean crushing load there is not a good agreement between the experimental results and the existing rigid-plastic solutions in which the strain hardening is not fully taken into account, while the empirical formula given by Magee et al. using the tensile strength instead of the yield stress has sufficient accuracy in spite of its simple form.

(4) The complicated crushing deformations can be successfully simulated by the finite element method. The obtained mean crushing loads are about 25% smaller on the average than the experimental values because of the thick-walled effect, however, there is a good agreement between them from a qualitative point of view.

1 序

角型鋼管は円筒鋼管とともに衝突エネルギー吸収部材 としてしばしば利用され、その挙動に関してもすでに多 くの研究が行われている。たとえば Wierzbicki ら¹), Meng ら²)は剛塑性理論解析手法によりエネルギー吸収 量の指標である平均圧壊荷重の算定を試みており、ま た、Magee ら³), Mahmood ら⁴)は平均圧壊荷重に関す る実験公式を定めている。 著者らは本研究の(その1)において,次数低減積分 法による低次有限要素モデルを用いた構造要素の超大変 形を伴う準静的圧壊解析プログラムを開発し⁵⁾,(その 2)においては,軸荷重を受ける円筒殻の非軸対称圧壊 問題につき実験的および数値的に検討した⁶⁾。本報で は,同じく軸荷重を受ける正方形断面の角型鋼管に関 し,実験および有限要素プログラムによりその圧壊挙動 を解明し,上述の諸研究の内容を再検討および改善する とともに,有限要素解析の効果およびその限界を明らか にした。

以下,第2章では本研究で実施した角型鋼管圧壊実験

^{*} 東京大学生産技術研究所

^{**} 東京大学生産技術研究所(研究当時東京大学大学院)

286



Fig.1 Stress-strain curves obtained from a uniaxial tensile test

Table 1	Material	properties	of	tested
	square tu	ıbes		

	συ	συ	point 1		point 2	
	(kg/mm²)	(kg/mm²)	σ1	E 1 (X)	σ₂	E 2(%)
R1	31.5	41.0	36.0	2.00	55.0	22.5
R2	28.0	37.5	33.0	2.50	49.5	25.0
R3	43.5	47.5	46.0	1.00	62.5	22.5
R4	44.5	49.0	55.0	6.25	69.0	20.0
R5	37.0	45.0	40.5	1.25	62.5	25.0
Rõ	34.0	43.0	37.5	2.50	55.0	20.0
R7	42.5	45.5	47.5	2.50	62.5	22.5
σ	σ_v : yield stress σ_v : tensile strength					

の内容を説明し、第3章では実験結果を既存の研究結果 と比較した。また、第4章では有限要素法により角型鋼 管圧壊挙動を数値的に検討し、第5章では本研究成果を 要約した。

2 角型鋼管の圧壊実験

肉厚・辺長比(以下 t/H と記す)の異なる角型鋼管7本(JIS 規格による一般構造用炭素鋼鋼管 STKR 41) に対し,軸圧縮荷重による圧壊実験を実施した。本章で は材料試験結果を含めて実験結果の概要を述べる。

2.1 材料試験結果

角型鋼管の圧壊実験に先立ち、7体の試験鋼管と同一 鋼管より引張り試験片を採取し、材料試験を実施した。 計測項目は荷重、標点間距離およびくびれ部の断面寸法 である。くびれ部の断面積を精度よく測定するのは容易 でないが、本材料試験ではくびれ部断面(初期形状は矩 形)の中央部肉厚(*t*)をマイクロメータで、板幅(*a*)を ノギスで計測し、長方形近似(*s*=*a*×*t*)により断面積 (*s*)を算定した。荷重値をこの断面積値で除した値を真 応力値とした。また、真ひずみ(対数ひずみ)値は計測

Table 2 Dimensions of tested square tubes

No.	H (mm)	t (mm)	L (mm)	area (mm²)	t/H
R1	87.364	2.167	450	757.27	0.0248
R2	72.943	2.076	380	605.71	0.0284
R3	86.737	3.050	450	1058.2	0.0351
R4	77.024	3.007	400	926.44	0.0390
R5	47.792	2.163	250	413.49	0.0453
R6	57.220	2.998	300	686.19	0.0524
R7	46.797	3.068	250	574.29	0.0655
H : width t : thickness L : overall length					

された標点間距離の変化より計算した。

材料試験により得られた公称応力・公称ひずみ関係お よび真応力・真ひずみ関係をFig.1に示す。前報の円筒 鋼管に対する材料試験結果と異なり、本試験結果では、 角型鋼管製作過程(冷間加工)における加工硬化により、 通常の軟鋼に見られる上降伏点、下降伏点は観察されな かった。第4章で実施するupdated Lagrangian formulation による有限要素解析では、計測された真応力・真 ひずみ関係を図中の破線で示すように原点、降伏点、点 1および点2を結ぶ3直線で近似し、相当応力・相当ひ ずみ関係として使用した。すべての試験片に対する降伏 応力値、引張り強度値、点1と点2における応力・ひず み値を Table 1 に示す。いずれも同一規格(STKR 41) の鋼管ではあるが、各鋼管の材料定数値間にはかなりの 相違が認められる。

2.2 角型鋼管の圧壊実験結果

圧壊実験に用いた7体の角型鋼管の寸法をTable2に 示す。いずれも正方形断面を有しており,全長は断面辺 長(Hと記す)の約5倍とした。試験体を平行な加圧盤 間に鉛直に据え置き,初期の全長の30%程度以下の長 さになるまで圧縮した。試験体表面には5mm間隔の格 子状シールを貼付するか,あるいは同様の格子を野書 き,圧壊モードの観察に役立てるとともに,実験後に圧 壊パターンの軸方向波長値を計測する際のスケールとし て用いた。

代表的な鋼管2体の圧壊過程を Fig.2 に示す。Fig.2 (b) は肉厚・辺長比の最も大きい鋼管 R7 (t/H= 0.0655)の圧壊過程であり,最初に端部近傍に4面がとも に外側に変形する座屈モード(以下,対称モードと称す る)を生じ,ついで向い合う2面が外側へ,他の2面が内 側へ変形する圧壊モード(以下,非対称モードと称する) に移行し、端から順次このモードで折り畳まれていく圧 壊過程が示されている。t/Hの大きい鋼管3体(R5, R6, R7) についてはほぼ同様の圧壊過程が観察された。ま た, Fig.2(a) は肉厚・辺長比の最も小さい鋼管 R1



(b) R7 Fig. 2 Experimental crushing processes



Fig. 3 Axially crushed square tubes

(*t*/*H*=0.0248)の圧壊過程であり、端部から離れたところに初めから非対称モードを生じ、圧壊が一方の端部に 到達すると再び初期の座屈位置から他端に向けて圧壊が 進展するという過程が見られる。*t*/*H*の相対的に小さい 鋼管4体(R1, R2, R3, R4)はほぼ同様の圧壊過程 を示した。厚肉の鋼管では圧壊初期の1,2波に対称モー ドが見られるものの、軸荷重による角型鋼管の圧壊において総体的には非対称モードが支配的である。

全鋼管7体の圧壊後の形状を Fig.3 に示す。前述の対

Table 3 Results of crush tests for axially loaded square tubes

No.	σ _{cr} (kg/mm²)	ocr/o,	σ n (kg/mm²)	σn/σy	σ∎/σu	λ/H (%)	δ/λ (%)
R1	31.330	0.994	8.254	0.262	0.201	59.1	78.9
R2	29.580	1.055	9.035	0.324	0.242	57.1	81.9
R3	44.750	1.023	13.886	0.319	0.292	61.4	81.1
R4	45.723	1.027	14.322	0.322	0.292	56.8	78.6
R5	42.914	1.159	15.934	0.430	0.354	60.2	84.7
R6	38.881	1.144	18.669	0.549	0.434	61.1	83.8
R7	47.571	1.119	24.671	0.580	0.542	66.8	85.0
$\sigma_{\rm er}$: buckling stress $\sigma_{\rm n}$: mean crushing stress $\lambda/{\rm H}$: half wavelength / width δ/λ : stroke to length ratio (for half wavelength)							

称モードの発生を除けば、肉厚・辺長比による圧壊モードの大きな相違は見られない。Fig.4 は全鋼管の荷重 (軸応力)・縮み量曲線であり、初期座屈時を除けばおお むね定常的な圧壊進展過程が認められる。図中破線は計 算された平均圧壊応力レベルを示している。また、 Table 3 には本圧壊実験結果が整理されており、座屈応 力(σ_{cr})、平均圧壊応力(σ_m)、軸方向半波長(λ)、スト



Fig. 4 Axial load-shortening curves (experiments)

ローク・長さ比 (δ/λ) などの各項目の数値が示されてい る。降伏応力で無次元化された座屈応力値,降伏応力と 引張り強度で無次元化された平均圧壞応力値,辺長で無 次元化された軸方向半波長値およびストローク・長さ比 の諸量は,いずれも若干のばらつきはあるものの,肉厚/ 辺長比の増大とともに大きな値をとる傾向が見られる。

3 圧壊実験結果に対する考察

3.1 座屈応力

本研究の主目的はエネルギー吸収を中心とした座屈後 挙動の把握にあるが,いうまでもなく座屈荷重自身も構 造設計上,重要な因子の一つであるので,まず実験で得 られた座屈荷重値を理論解と比較した。

正方形断面を有する角型鋼管が軸圧縮荷重により非対称モードで座屈する場合,その座屈荷重は周辺支持の矩形板座屈荷重として与えられる。すなわち,塑性座屈応力は次式で表わされ,

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2}{12} \left(\frac{t}{H}\right)^2 \left[2\sqrt{D_x D_y} + D_{xy} D_{yx} + 4G_t\right]$$
(1a)

ここに

$$D_{x} = \frac{E_{x}}{1 - \nu_{x}\nu_{y}}, \quad D_{y} = -\frac{E_{y}}{1 - \nu_{x}\nu_{y}} \\ D_{xy} = -\frac{\nu_{y}E_{x}}{1 - \nu_{x}\nu_{y}}, \quad D_{yx} = -\frac{\nu_{x}E_{y}}{1 - \nu_{x}\nu_{y}}$$
 (1b)

固有半波長λは次式で与えられる。

$$\frac{\lambda}{H} = \frac{4}{D_y} \frac{D_x}{D_y} \tag{2}$$

(1a) 式および (1b) 式における係数 $E_x, E_y, G_t, \nu_x, \nu_y$ は一方向圧縮による矩形板の塑性座屈問題を弾性直交異 方性板の座屈と見做した時の接線係数値で各種塑性座屈 理論により異なった値をとる⁷。たとえば, 藤田⁸)によ る直交異方性接線係数理論ではこれらの各係数は次式の 値をとる。

$$E_{x} = E_{t}, \quad E_{y} = E, \quad G_{t} = \frac{EE_{t}}{E + (1 + 2\nu)E_{t}}$$

$$\nu_{x} = \nu \frac{E_{t}}{E}, \quad \nu_{y} = \nu$$

$$(3)$$

(1a),(1b),(3)式に従い,塑性座屈応力値を計算した。計算の際は,Table 1 に示した降伏応力および引張り強度の値を用いて,Fig.5 のような接線係数・相当応力関係を仮定した。計算値と実験値の比較をFig.6 に示す。前述したように7体の試験体中,3体は対称モードで座屈しており本計算の仮定と異なるが,全体的に計算値と実験値は良好に対応している。

3.2 圧壊波長

続いて,非対称の周期的圧壊パターンにおける軸方向 波長に関し検討した。本圧壊実験での観察によれば,完



全圧壊時の軸方向波長は初期座屈時の座屈波長によりほ ぼ決定されると考えてよいようである。そこでまず、 (2)式により定まる座屈固有半波長について考える。 (1b)式および(3)式を用いると、(2)式は次式のよ うになる。

$$\frac{\lambda}{H} = \sqrt[4]{\frac{E_t}{E}} \tag{4}$$

すなわち,座屈半波長値は座屈時の接線係数値の 1/4 乗 に比例することになる。したがって t/H が大きくなる ほど座屈応力が増加する,すなわち接線係数値が低減す ることを考慮すれば,固有半波長は t/H の増大とともに 短くなると考えられる。しかしながら,本圧壊実験で観 察された軸方向波長は,0.5から0.7 程度の範囲で t/Hの増大とともに漸増の傾向にあり,(4)式は定性的な妥 当性を欠いている。この結論は $E_x \neq E_y$ と仮定された (3)式以外の他のいくつかの塑性座屈理論(Handelman・Prager⁹⁾, Kaufman¹⁰⁾, Bleich¹¹⁾ など) に対し ても同様である。また, $E_x = E_y$ と仮定された等方性塑 性座屈理論(Ros・Eichinger¹²⁾,山本¹³⁾) では $\lambda/H=1$ なる一定値をとるがこれも実験結果と対応しない。した がって、少なくとも既存の塑性座屈理論解では、座屈荷 重に関してはともかく、圧壊モードに関しては実験結果 290





Fig.7 Variation of plastic buckling stresses with axial half wavelength



Fig. 8 Axial half wavelength (experimental, theoretical and finite element results)

を説明できないとの結論になる。

そこで有限要素法により数値的にこの問題を検討した。すなわち、軸方向座屈波長の値を変化させて弾塑性 座屈計算を行い、最小の座屈荷重値を与える波長値を決 定した。R1、R5、R7の3体の試験体に対する計算結 果をFig.7に示す。軸方向波長値に関する刻みはやや粗 いが試験体 R1、R5 では $\lambda/H=0.6$,試験体 R7 では $\lambda/H=0.7$ 近辺で座屈荷重が最小となっていることがわ かる。この計算結果はFig.8に示すように、本実験で測 定された圧壊モード波長値と良好に対応しており、数値 計算により定量的により信頼度の高い解析を行えば、弾 塑性座屈問題の解として圧壊波長をほぼ妥当に評価でき ることを示している。

なお, Fig.8 には参考として次式により計算される圧 壊半波長も合わせて記入した。

$$\frac{\lambda}{H} = 1.966 \sqrt[3]{\frac{t}{H}} \tag{5}$$

上式は Wierzbicki ら¹⁾により与えられた圧壊半波長 の理論式であり、剛塑性理論解析による平均圧壊荷重を 最小化するように定められている。Fig.8 を見る限り, 実験結果との対応は比較的良好であるが、圧壊過程は履 歴依存の不可逆過程であり、吸収エネルギー最小化が必 ずしも圧壊モードの決定原理とはなり得ないと考える。

3.3 平均圧壊応力

構造要素の衝突エネルギー吸収能評価の目安となる平 均圧壊応力値に関し、本実験結果を既存の剛塑性理論解 析解および実験公式と比較した。

圧壊過程における塑性関節線の移動を考慮した平均圧 壊応力の剛塑性理論解析解として、Wierzbicki ら¹⁾は, 次式を誘導している。

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 2.39 \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_y}\right) \left(\frac{t}{H}\right)^{2/3} \tag{6}$$

ここに、 σ_0 はひずみ硬化の影響を考慮するために導入された塑性流れ状態における平均応力値であり、 $\sigma_0 = \sigma_y$ とすれば、(6)式は剛/完全塑性体に対する解となる。また、同様の解析により、Meng S^2 は次式を与えている。

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 3.95 \left(\frac{t}{H}\right) \tag{7}$$

一方,平均圧壊応力を算定するための半実験公式として, Mahmood ら⁴)は次式を示している。

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = \left\{ \frac{0.415 E(t/H)^2}{(1-\nu^2)\beta\sigma_y} \right\}^{0.43}$$
(8)

ここに、 β はひずみ硬化の影響を含めるために設定した パラメータであり、t/Hの値に応じて $1 \leq \beta \leq \sigma_u/\sigma_y$ の値 をとる。また、Magee ら³は降伏応力 σ_y の代わりに引 張り強度 σ_u を用いて、次式の平均圧壊応力算定式を提 示している。

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1.4 \left(\frac{4t}{H}\right)^{0.8} \tag{9a}$$

または

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 4.24 \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y}\right) \left(\frac{t}{H}\right)^{0.8} \tag{9b}$$

(6)式,(7)式,(8)式および(9b)式から計算さ れる平均圧壊応力値と本圧壊実験値との比較を Fig.9に 示す。計算の際,(6)式の σ_0 は σ_y と等しいと仮定し た。Fig.9 の結果を見ると,(6)式と(7)式の剛塑性 理論解析解はいずれも本実験値をかなり下回っている が,これはひずみ硬化の影響が全く含まれていないこと による。(6)式に関しては, σ_0 の値を適当に仮定する ことにより,より改善された解を与える可能性はある が,この値を実験によらず理論的に求めるのは困難であ ろう。また,(8)式と(9b)式の半実験式は本実験結果



plastic solutions)



Fig. 10 Relation between structural effectiveness and relative density (experimental results and empirical formula)

と非常に良好に対応しており、特に、(9b)式は簡単な 表現であるにもかかわらず精度は高い。

Fig. 10 は (9a) 式と本実験結果の比較である。Fig.9 との相違は、縦軸の平均圧壊応力値が引張り強度で無次 元化されている (この量を structural effectiveness と 呼ぶことがある³⁾)こと、および横軸についても (9a) 式 の表現に従い relative density (構造要素の実質部分の 体積とそれによって囲まれる部分の容積の比であり、角 型鋼管の場合は 4t/H)をプロットしている点である。 平均圧壊応力値は座屈後の大ひずみ領域における挙動よ り定まるため、降伏応力よりも引張り強度で無次元化し た方がばらつきが少なく、実験式としてより簡単な表現 が可能であることが理解される。



Fig. 11 Unit area of the periodic crushing pattern

4 角型鋼管の有限要素圧壊解析

本章では、本研究の(その1)で開発した薄肉鋼構造 要素の超大変形圧壊解析用有限要素プログラムにより、 軸荷重を受ける角型鋼管の圧壊挙動を解析し、主として 平均圧壊荷重値に関し、本実験結果と比較する。

4.1 解析仮定

前報の円筒鋼管の場合と同様に,規則的な圧壊パター ンにおける基本周期領域のみを解析対象とする。具体的 には Fig.11 の斜線部であり,軸方向半波長として実験 により得られた値を仮定する。この部分に弾性座屈モー ドに対応する2重正弦波形の初期たわみ(最大値で肉厚 の0.2%程度)を与え,周辺に対称条件を課した上で軸 方向に圧壊する。材料定数として,2.1節記載の3直線 近似による相当応力・相当ひずみ関係を仮定する。

全試験鋼管の解析を行う前に,必要十分な要素分割数 を決定するため,鋼管 R4に対し次の3種類の一様な要 素分割による試計算を実施した。





Fig. 13 Effect of mesh subdivisions on crushing deformations



Fig. 15 Plastic buckling stresses (experimental and finite element results)



and finite element results)

(C) $N 1 \times N 2 = 10 \times 20$

ここに、N1 および N2 はそれぞれ Fig.11 の斜線部に 対する軸方向および周方向の分割数である。厳密には鋼 管側面間には曲り部が存在するが、大変形時のエネルギ -吸収には大きな影響は及ぼさないものと考え、曲り部 の曲率は無視したモデル化を行った。

Fig. 12 および Fig. 13 に解析の結果得られた荷重・縮 み量曲線および圧壊変形過程を示す。 これらの結果よ り、 7×14 の要素分割でもほぼ収束解が得られていると 判断されるが、より安全を見込んで最も細かい、 10×20 の要素分割を用いて全試験体の解析を行うこととした。



Fig. 17 Relation between structural effectiveness and relative density (experimental results, empirical formula and finite element solutions)

なお Fig. 12 を見ると,最も粗い 5×10 の分割でも δ/λ =0.1 程度まではより細かい分割による結果と大差な く,本解析で用いた次数低減積分法による低次要素が高 い計算効率を有していることが示されている。逆に,超 大変形・大ひずみを伴う圧壊問題においては通常の最終 強度解析と比較し,より多自由度のモデル化を要求され ることが理解される。また Fig. 13 からは,塑性関節線 の移動を含む角型鋼管の複雑な圧壊変形過程が実際の現 象に極めて忠実にシミュレートされていることがわか る。

4.2 圧壊解析結果

全試験体7体に対する解析結果を Fig. 14~Fig. 17 に 示す。

Fig. 14 は荷重・縮み量曲線の計算結果である。この 計算結果による座屈荷重値(最大荷重値)を Fig. 15 で 実験値と比較している。対称モードで座屈した厚肉鋼管 3体については実験値と若干相違しているものもある が,総体的に実験値との対応はよい。なお, Fig. 6 で塑 性座屈応力の理論値を計算した際に仮定した応力・ひず み関係と,本有限要素解析で用いた応力・ひずみ関係は 若干異なっていることに注意されたい。そのため実験値 との対応にも相違がある。

Fig. 16 は, Fig. 14 の荷重・縮み量曲線から計算され た平均圧壊応力値を降伏応力で無次元化した値と対応す る実験値との比較である。また, Fig. 17 は, 引張り強 度で無次元化した平均圧壊応力値と対応する実験値の比 較である。有限要素解析結果は定性的には, すなわち肉 厚・辺長比の値による変化の様子は実験結果と良好に対 応しているが, 定量的には実験値を平均 25% 程度下回 っている。この原因は,本圧壊実験で使用した角型鋼管 がかなり「厚肉」であるにもかかわらず, 薄肉仮定によ る解析を行っている点にあると考える。すなわち,前報 における円筒鋼管の非軸対称圧壊解析においても,R/t(半径・肉厚比)が 60~100 程度の薄肉円筒に対しては 実験値と計算値が比較的良好に一致したが,より厚い円 筒鋼管に対しては,角型鋼管の場合と同程度の相違を見 せた。今回の実験で使用した角型鋼管のH/2t(円筒鋼 管の場合のR/tに相当する)の値は 8~20 程度であり, 前報の円筒鋼管の場合と比べても相当に厚肉である。し たがって,定量的により改善された解を得るためには 3 次元解析に頼らざるを得ない。

5 結 言

本研究では、構造要素の衝突圧壊挙動に関する基礎的 研究の(その3)として、軸荷重を受ける角型鋼管7体 の圧壊実験を実施し、座屈荷重、圧壊波長および平均圧 壊荷重の各項目に関し、既存の研究結果との比較・検討 を行うとともに(その1)で開発した有限要素コードに よる数値解析を実施した。得られた成果を要約すると以 下のとおりである。

(1) 座屈荷重に関しては,既存の塑性座屈荷重理論 解および有限要素解ともに実験値と良好な対応を見た。

(2) 圧壊波長に関しては、既存の座屈波長理論解は 定性的にも実験結果と相違するが、塑性座屈荷重を最小 化する有限要素解は定性的および定量的にも実験値と良 好に対応した。また、剛塑性理論解析による平均圧壊荷 重値を最小化する Wierzbicki の解も実験値の傾向とほ ぼ対応している。

(3) 平均圧壞荷重に関しては,以下のことが明らか となった。すなわち,既存の剛塑性理論解析解はひずみ 硬化の影響を十分に考慮しておらず,実験値とは比較的 大きな隔たりがあるが,実験公式,特に材料の引張り強 度で整理した Magee らによる式は簡単でかつ十分な精 度を有している。

(4) 有限要素法による圧壊解析は,複雑な圧壊変形 過程を実際の現象に忠実に再現した。得られた平均圧壊 荷重値は「厚肉」の影響のために実験値を 25% 程度下 回ったが,肉厚・辺長比の影響など定性的には実験値と 良好に対応していた。したがって,本圧壊実験で使用し た鋼管よりも若干「薄肉」の鋼管に対しては,定量的に も十分な精度を有すると予想される。

参考文献

- T. Wierzbicki and W. Abramowicz : On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures, J. of Appl. Mech., Vol. 50 (1983), 727.
- Q. Meng, S. T. S. Al-Hassani and P. D. Soden : Axial Crushing of Square Tubes, Int. J. Mech. Sci., Vol. 25, No. 9~10 (1983), 747.

294

- C. L. Magee and P. H. Thornton : Design Considerations in Energy Absorption by Structural Collapse, S. A. E. paper, No. 780434 (1978).
- H. F. Mahmood and A. Paluszny: Design of Thin Walled Columns for Crash Energy Management—Their Strength and Mode of Collapse, S. A. E. paper, No. 811302 (1981).
- 5) 都井 裕,弓削康平,川井忠彦:構造要素の衝突 圧壊強度に関する基礎的研究(その1)一有限要 素法による超大変形圧壊解析一,日本造船学会論 文集,第159号(1986),245.
- 都井裕、弓削康平、川井忠彦:構造要素の衝突 圧壊強度に関する基礎的研究(その2)一円筒殻 の非軸対称圧壊実験と有限要素解析一、日本造船 学会論文集、第160号(1986)、433.
- 7) 木原 博監修: 塑性設計法, 森北出版 (1960).

- 8) 吉識雅夫,藤田 譲: 圧縮力を受ける波板の最高 荷重について,造船協会論文集,106号(1959), 163.
- D. C. Handelman and W. Prager : Plastic Buckling of a Rectangular Plate under Edge Thrust, NACA TN-1530 (1948).
- W. Kaufmann: Über unelastisches Knickaufgabe für rechtechkiger Platten, Ing. Arch., 7 (1936), 207.
- F. Bleich : Buckling Strength of Metal Structures, McGraw-Hill (1952).
- 12) M. Ros and A. Eichinger : Final Rep. 1 st Congr., IABSE, Paris (1932), 144.
- 山本善之: A General Theory of Plastic Buckling of Plates, 造船協会論文集, 96号 (1955).