208 偏心軸圧縮荷重を受ける有孔正方形短柱鋼管 の局部座屈強度に関する実験的研究 (4 開口壁面の場合)

Experimental Studies of the Local Buckling Strength of Carbon Steel Square Pips
with a Circular Hole Subjected to Eccentric Axial Compressive Load
(In the Case of Four Hole Walls)

正 北澤 敏行 (東海大)

Toshiyuki KITAZAWA, Tokai University, 1117, Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa

Key Words : Buckling, Combined Stress, Experimental Stress Analysis, Eccentric Compressive Load

1. まえがき

一般の構造部材の基本構成部材として鋼管が幅広く使用されている。筆者は、正方形短柱鋼管の座屈問題として、中央壁面に円開口を有する1壁面および平行2壁面の場合において、軸心および偏心軸圧縮荷重が作用する場合の座屈実験を行い座屈応力を求めるための実験式の提案を行った^{(1), (2)}。また、多壁面中央に円開口を有する場合において軸圧縮荷重を受ける場合についても報告した⁽³⁾。

本研究は、両端球座支持の4壁面の中央に1円開口を有する正方形短柱鋼管において、開口側で上下端の等偏心点・異偏心点および上端偏心点下端軸心点に軸圧縮荷重が作用した場合の座屈実験を行い、座屈強度に影響を及ぼす主パラメータの実験的解明と平板のエネルギー法を用いて座屈解析を行い実験結果を考慮した実験係数を含んだ単純化した座屈応力を求めるための実験式の検討を行ったものである。

2. 実験

2.1 試験片 本実験で使用した試験片の形状、主要寸法をFig.1およびTable 1に示す。Table 1においての λ は $d/c=0$ の場合の細長比($\lambda=c/k$, k : 回転半径)を示す。なお、以下、開口を有する正方形短柱鋼管および無開口正方形短柱鋼管をそれぞれ有孔鋼管および鋼管と称する。

2.2 実験条件 試験片の支持条件は両端球座であり、荷重条件は軸圧縮荷重である。荷重位置は無開口の重心点Oより開口壁面側に上下端において等偏心($e_1=e_2=e$)・異偏心($e_1>e_2\neq 0$)および上端偏心($e_1=e$)下端軸心($e_2=0$)である。本論文において、実験中の最大の圧縮荷重を圧縮崩壊荷重と定義し、座屈荷重の決定に当たっては δ^2 法により決定した⁽³⁾。また、開口径 d および偏心距離 e を示す係数として d/c を開口比と定義し偏心比 ξ をTable 2で定義する。なお、係数 α については3.3節で述べる。

3. 実験結果および考察

3.1 崩壊経過 本実験の結果によれば、実験中の圧縮荷重が最大値(圧縮崩壊荷重)に達すると同時に、偏心側開口壁面開口近傍に大きな変形を生じ、これに伴って壁面に大きな横たわみが発生し、全体の崩壊を引き起こしている。圧縮崩壊荷重と δ^2 法による座屈荷重とほぼ一致しており、本研究においての崩壊は偏心側開口壁面の局部座屈(壁面座屈)である。

3.2 開口比および偏心比の影響 各偏心条件下での、座屈応力比 $\sigma_{crhd}/\sigma_{cr}$ と開口比 d/c および偏心比 ξ との関係をFig.2~Fig.4に示す。ここで、 σ_{crhd} および σ_{cr} は偏心軸圧縮荷重を受ける有孔鋼管および軸圧縮荷重を受ける鋼管の座屈応力を示す。Fig.2~Fig.4に示すように、本実験において、いずれの偏心条件においても、座屈応力に影響を与えるのは開口比 d/c および偏心比 ξ であることを示している。すなわち、座屈応力比 $\sigma_{crhd}/\sigma_{cr}$ は開口比 d/c および偏心比 ξ が増加するに従って減少することを示していることが判る。この結果は壁面中央に円開口を有する1壁面および平行2壁面の場合と同じ結果である。

以上の検討結果より、座屈応力に影響を与える主パラメータは開口比 d/c および偏心比 ξ であり、既報の結果^{(1)~(3)}より、細長比 λ が10以下においては、偏心側開口壁面の高さの影響はないものと考えられる。

3.3 実験式の検討 以上の検討結果より、本問題を圧縮と曲げを同時に受ける周辺単純支持の有孔正方形平板の座屈問題として壁面中央に円開口を有する1の壁面の場合と同様⁽³⁾、平板のエネルギー法を用いて座屈解析を行い、座屈応力を求めるための計算式を検討する。開口壁面のたわみ波形 w を荷重方向を y とし次式で仮定する。

$$w = w_1 + w_2 \quad \text{--- (1)}$$

ここで、 w_1 : 軸圧縮荷重により生ずる横たわみ

w_2 : 偏心により生ずる曲げモーメントにより生ずる横たわみ

を示す。圧縮と曲げを同時に受ける開口壁面のエネルギー式は次式で与えられる^{(1)~(3)}。

$$\frac{\pi}{\sigma_y} = \sigma_y(1+\alpha) = \frac{(D/2) \iint \{k_1 - 2(1-\nu)k_2\} dx dy}{-(t/2) \iint (k_3 + k_4 + 2k_5) dx dy} \quad \text{--- (2)}$$

ただし、 $k_1 = \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2$

$$k_2 = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2, \quad k_3 = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2$$

$$k_4 = \frac{\sigma_y}{\sigma_y} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2, \quad k_5 = \frac{\tau_{xy}}{\sigma_y} \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial y}$$

ここで、 ν はポアソン比を示し、 D は平板の曲げ剛性を示す。また、 σ_x 、 σ_y および τ_{xy} は任意の円形開口を有する壁面の応力分布を示し、圧縮と曲げを同時に受ける場合の荷重辺の圧縮応力 σ_y の共通因数である。 σ_x 、 σ_y および τ_{xy} は有限要素法(FEM)を用いて計算した。 σ_y は軸圧縮荷重

Fig.1 Shape of specimen

Table 1 Dimension of specimen

No	c (mm)	t (mm)	r (mm)	λ	e (mm)		d/c
					e ₁	e ₂	
I	58.4	1.6	3.0	2.4	0-15.0	0-15.0	0-0.43
II					5.5-15.0	2.5	
III					2.5-15.0	0	

Table2 ξ and α ⁽³⁾

No	e ₁	e ₂	ξ	α
I	e ₁ =e ₂ =e		$\xi = \alpha = 2(e/c)$	
II	e ₁ > e ₂ ≠ 0		$2(e_0/c)$	$2.8(e_0/c)$
III	e ₁ =e, e ₂ =0		$\xi = \alpha = e/c$	

$$e_0 = 1/2(e_1^2 - e_2^2)^{1/2}$$

により生ずる荷重辺の圧縮応力ある。また、係数 α は、実験結果が既報の1円開口を有する場合と同じであるので1円開口を有する場合の係数 α を用いた(Table2参照)。式(2)に式(1)を代入し、 σ_y の最小値、すなわち、 σ_y の最小値を求めれば、座屈応力 σ_{crh} が求められる。無開口の場合の軸心圧縮による座屈応力 σ_{cr} で無次元化すれば、次式が得られる。

$$\frac{\sigma_{crh}}{\sigma_{cr}} = \frac{\sigma_{crh}}{\sigma_{cr}} \cdot \frac{\sigma_{cre}}{\sigma_{cr}} \quad \text{----- (3)}$$

$$\frac{\sigma_{cre}}{\sigma_{cr}} = \frac{1}{1+\alpha} \quad \text{----- (4)}$$

$$\frac{\sigma_{crh}}{\sigma_{cr}} = \frac{K_0}{K} = 1 - 0.94(d/c)^{1.47} \quad \text{----- (5)}$$

ここで、式(4)は、偏心軸圧縮荷重を受ける鋼管の座屈応力 σ_{cr} を⁽¹⁾、また、式(5)は、軸心圧縮荷重を受ける開口4壁面を有する有孔鋼管の座屈応力 σ_{crh} を求めるための計算式である⁽³⁾。式(5)中のKは鋼管の座屈応力係数でK=4であり、K₀はエネルギー式(2)においての数値項を示す(開口比b/cが約0.4まで実験値とよく近似する)。式(3)~式(5)は円開口を有する有孔鋼管と同じ形式の計算式^{(1),(2)}であり、Fig.2~Fig.4の実線は式(3)~式(5)による計算値を示す。図示のように、計算値と実験値はほぼ一致している。

以上の検討結果より、式(3)~(5)は4壁面に円開口を有する正方形短柱鋼管において、開口側で上下端の等偏心点・異偏心点および上端偏心点下端軸心点に軸圧縮荷重が作用した場合の座屈応力を推定できる計算式としても有効

Fig.2 (e₁=e₂=e)

Fig.3 (e₁ > e₂ ≠ 0)

Fig.4 (e₁=e, e₂=0)

であると考えられる。

4. あとがき

本研究で得られた結果を要約すると下記のとおりである。

- (1) いずれの偏心条件の場合においても、圧縮荷重が最大値(圧縮崩壊荷重)に達すると偏心側開口壁面開口部近傍に局所的な変形(壁面座屈)を生じ崩壊する。
- (2) 座屈応力比 σ_{crh}/σ_{cr} は同じ開口比b/cおよび偏心比 ξ に対してほぼ一致しており、座屈応力比 σ_{crh}/σ_{cr} は開口比b/cおよび偏心比 ξ の増加に伴って減少する。
- (3) 座屈応力を求めるための計算式として、開口比b/cおよび偏心比 ξ をパラメータとした実用上有効と考えられる式(3)~(5)を得た。

参考文献

- (1) 北澤・他1名, 機論(A), 52-481(1986), 2236-2240.
- (2) 北澤, 機講論, 040-4(2004), 171-172.
- (3) 北澤, 学位論文, 以下省略.