

衝撃的突き上げを受ける変断面鋼管短柱の動的塑性局部座屈強度の検討

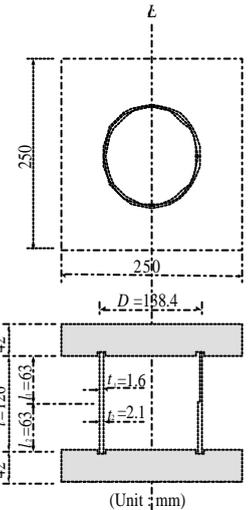
防衛大学校 正会員 森 雅美 武蔵工業大学 フェロー 増田陳紀

1. はじめに

大地震における鋼製円筒橋脚の断面変化部直上での環状軸対称局部座屈に関しては、衝撃的上下動による影響も無視できず、軸圧縮力を受ける変断面鋼管短柱の座屈耐力について基礎的に検討することが重要と思われる。本研究は、局部座屈損傷の要因としての衝撃的上下動の可能性を検討するために行った先の変断面鋼管短柱の衝撃的突き上げ実験¹⁾に基づき、静的塑性局部座屈強度の算定式にひずみ速度効果を導入した動的塑性局部座屈強度の算定式を提案するとともに、実験結果との比較によりその妥当性を検証したものである。

2. 実験の概要¹⁾

(1) 供試体 供試体は、図-1 に示す板厚 42mm の上・下鋼板と一体化した管種 STPG370 S-H 125A SCH20 (下降伏応力: $\sigma_{y,l}$ 283MPa) の原管より作製された変断面鋼管短柱で、外径は $D=138.4\text{mm}$ 、全長は $l(=2l_1+2l_2)=126\text{mm}$ (l/D 0.91)、薄肉側上部の板厚は $t_1=1.6\text{mm}$ (D/t_1 86.5)、厚肉側下部の板厚は $t_2=2.1\text{mm}$ (D/t_2 65.9, t_2/t_1 1.31) である。供試体上部には、上部工を模擬した重錘 (重量: sP_0 24.7kN, 軸力比: sP_0/P_y 0.13, $P_y=A_1\sigma_{y,l}$, A_1 : 薄肉側上部の断面積) を上載している。



(2) 計測項目 計測項目は、図-2 に示す供試体の上と下に設置した自作の上・下ロードセルの荷重 (P_u, P_l)、突き上げ板 (u_l) と重錘 (u_w) の変位、下部鋼板の左・中央・右 (a_{ll}, a_{lc}, a_{lr})、上部鋼板 (a_u) と重錘 (a_w) の加速度、および供試体の軸方向の 6 断面 (薄肉側上部の 4 断面 (S1~S4) と厚肉側下部の 2 断面 (S5, S6)) での正面 (Front) とその対角の背面 (Back) の軸ひずみ (G1~G12) である。

(3) 実験ケース 実験ケースは、表-1 に示す入力速度 ($v=0.73, 0.91, 1.09$ と 1.38m/s の 4 種類) と強制変位量 ($u=2.5, 5, 7.5$ と 10mm の 4 種類) の組み合わせを考えた合計 20 ケースとした。

図-1 供試体の形状・寸法

3. 実験結果と考察

(1) 局部座屈モード 本実験では表-1 の実験ケースに対して図-3 に示す 4 通りの局部座屈モードが現れた。その区分 (Type A, B, C と D) を同表の括弧内の英字で示す。

(2) 動的荷重～変位関係 実験結果の一例として、図-4 に局部座屈モード Type B の実験ケース”H5-1”の動的荷重～変位関係 (実線) を示す。動的荷重 P は厚肉側下部の断面

S6 の軸圧縮ひずみ (G_{11}, G_{12}) の平均値 に軸剛性 EA_2 (E : 縦弾性係数, A_2 : 厚肉側下部の断面積) を乗じて算定 ($P=EA_2 \epsilon$) したものであり、変位 u は下端変位 u_l から上端変位 u_w を差し引いた軸方向変形量 ($u= u_l - u_w$) である。

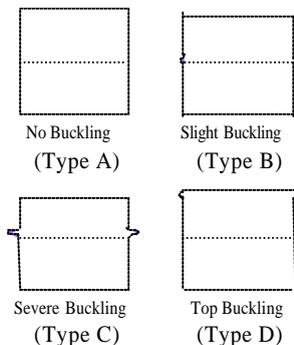


図-3 局部座屈モード

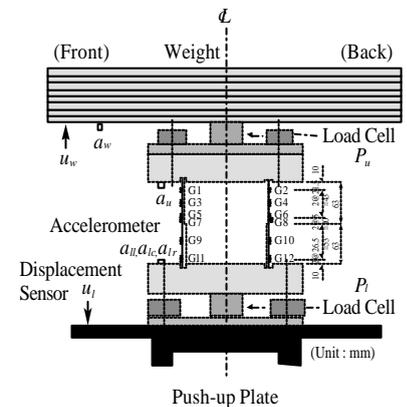


図-2 計測項目

表-1 実験ケースと実験結果 (局部座屈モード)

$v(\text{m/s})$	$u(\text{mm})$	2.5	5	7.5	10
0.73 (Low Speed)	PPPP	L2.5-1 (A)	L5-1 (A)		L10-1 (D)
0.91 (Med.-Low Speed)	PPPP	ML2.5-1 (A) ML2.5-2 (A)	ML5-1 (B) ML5-2 (B)		ML10-1 (C)
1.09 (Med.-High Speed)	PPPP	MH2.5-1 (A) MH2.5-2 (A)	MH5-1 (B) MH5-2 (B)		MH10-1 (C)
1.38 (High Speed)	PPPP	H2.5-1 (A) H2.5-2 (A)	H5-1 (B) H5-2 (B)	H7.5-1 (C)	H10-1 (C) H10-2 (C)

[註] 括弧内の英字は、図-3 に示す局部座屈モードを示す。

キーワード：衝撃的上下動，変断面鋼管短柱，突き上げ実験，局部座屈強度

連絡先：〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 TEL：046-841-3810 (内 2365) FAX：046-844-5913

これより，動的塑性局部座屈荷重 $dP_{cr,p}$ は図中の動的荷重の最大値 dP_{max} (253kN)に重錘重量に起因する初期静的荷重 sP_0 (24.7kN)を加算して約278kNと求まり，静的塑性局部座屈荷重 $sP_{cr,p}$ (188kN)より約48%上昇していることがわかる。上昇の原因は材料のひずみ速度効果によるものと考えられ，以下に検討する。

4. 動的塑性局部座屈強度算定式の提案

(1) 静的塑性局部座屈強度算定式

変断面鋼管短柱の静的塑性局部座屈強度 $s\sigma_{r,p}$ に関しては，著者ら²⁾により次式が提案されている。

$$\frac{s\sigma_{r,p}}{s\bar{\sigma}_y} = 1 \quad (8.0 \leq \bar{a} \leq 12.5) \quad (1)$$

ここに， $\bar{a} (= (E/s\bar{\sigma}_y) = (D/t))$ は無次元化局部座屈パラメータである。

(2) 動的塑性局部座屈強度算定式

式(1)の静的荷重時と同様に動的荷重時（衝撃突き上げ実験時）においても，動的塑性局部座屈強度 $d\sigma_{r,p}$ が動的降伏応力 $d\sigma_y$ に一致すると仮定すれば，動的降伏応力 $d\sigma_y$ はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の影響を受けるため動的塑性局部座屈強度 $d\sigma_{r,p}$ もひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ に依存することになる。したがって，動的塑性局部座屈強度 $d\sigma_{r,p}$ の算定式は，式(1)の静的塑性局部座屈強度 $s\sigma_{r,p}$ の算定式をひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関数として拡張すれば，次式のように定式化される。

$$\frac{d\bar{\sigma}_{r,p}(\dot{\epsilon})}{d\bar{\sigma}_y(\dot{\epsilon})} = 1 \quad (8.0 \leq \bar{a} \leq 12.5) \quad (2)$$

式(1)と式(2)より，

$$\frac{d\bar{\sigma}_{r,p}(\dot{\epsilon})}{s\bar{\sigma}_{r,p}} = \frac{d\bar{\sigma}_y(\dot{\epsilon})}{s\bar{\sigma}_y} = f(\dot{\epsilon}) \quad (3)$$

ここに， $f(\dot{\epsilon})$ は静的降伏応力 $s\sigma_y$ に対する動的降伏応力 $d\bar{\sigma}_y(\dot{\epsilon})$ の上昇を表す降伏応力変化率である。よって，動的塑性局部座屈荷重 $dP_{cr,p}(\dot{\epsilon}) (= A_1 d\bar{\sigma}_{r,p}(\dot{\epsilon}))$ の算定式は，式(1)と式(3)より次式のように得られる。

$$dP_{cr,p}(\dot{\epsilon}) = A_1 s\bar{\sigma}_y f(\dot{\epsilon}) \quad (4)$$

降伏応力として下降伏応力を用いれば，著者らの行った原管の高速引張試験結果³⁾より下降伏応力変化率 $f(\dot{\epsilon})$ は次式のように定式化される。

$$f(\dot{\epsilon}) = \frac{d\bar{\sigma}_y(\dot{\epsilon})}{s\bar{\sigma}_y} = 10^{a_1 \log \dot{\epsilon} + b_1 + c_1}; \quad a_1 = 0.548; b_1 = 0.158; c_1 = 0.993 \quad (5)$$

式(5)のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ に関する適用範囲は試験結果を内挿する $10^{-6} \leq \dot{\epsilon} \leq 10^0$ (s^{-1}) の範囲である。式(5)の下降伏応力変化率～ひずみ速度 ($f(\dot{\epsilon}) \sim \dot{\epsilon}$) 関係を図-5に示す。

静的荷重時と表-1の全ての実験ケースでの動的塑性局部座屈荷重～ひずみ速度 ($dP_{cr,p}(\dot{\epsilon}) \sim \dot{\epsilon}$) 関係を図-6に示す。図中，実線は式(4)の動的塑性局部座屈荷重の提案式を示し，●印と×印はそれぞれ局部座屈が発生する場合としない場合の動的荷重を示している。同図より，局部座屈が発生する場合の実験結果(●印)は概ね提案式(実線)の曲線上にあり，一方，局部座屈が発生しない場合の実験結果(×印)は提案式(実線)の曲線より小さな荷重(重錘慣性力)が作用した場合に区分される。すなわち，提案式(実線)は本実験における局部座屈発生条件(発生するか否かの判定)を適切に表現できているものと思われる。

【参考文献】1)森，増田：第59回年講，I-367, pp.733-734, 2004.9. 2)森，増田，香月：第60回年講，I-359, pp.715-716, 2005.9. 3)川畑：防衛大学校 第47期 土木工学専攻卒業論文，pp.5-13, 2003.3.

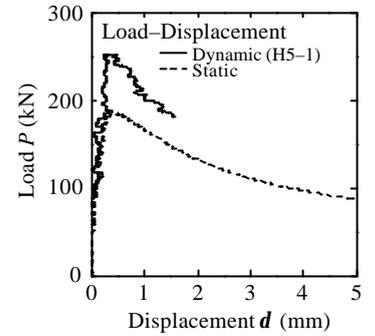


図-4 動的荷重～変位関係 (Type B)

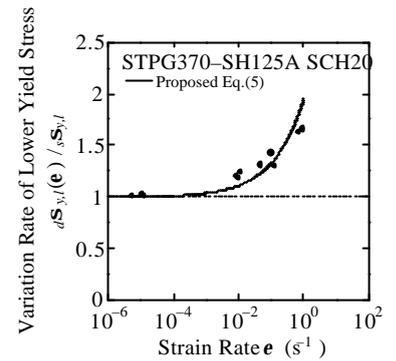


図-5 下降伏応力変化率～ひずみ速度関係

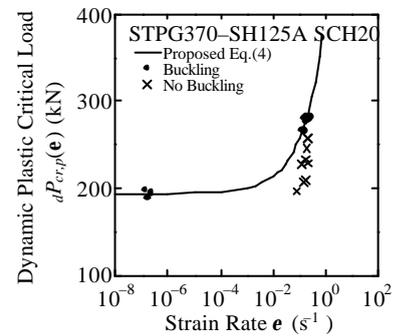


図-6 動的塑性局部座屈荷重～ひずみ速度関係