

衝撃的突き上げを受けるアルミニウム合金管柱の動的塑性局部座屈に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON DYNAMIC LOCAL BUCKLING OF ALUMINUM ALLOY COLUMN SUBJECTED TO IMPULSIVE LOADS BY PUSH-UP MOTION

森 雅美*・石川信隆**・松山英治***・鈴木信久****・香月 智†

*正会員 防衛大学校講師 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**フェロー 工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

***正会員 NKK エンジニアリング研究所 エネルギー研究室 (〒210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町 1-1)

****正会員 工博 NKK エンジニアリング研究所 エネルギー研究室長 (〒210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町 1-1)

†正会員 工博 防衛大学校助教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

This paper presents both static and dynamic experimental approaches for the reappearance of bulge local buckling phenomenon of aluminum alloy column. First, the high-speed tensile test of aluminum alloy specimens was performed, and the strain rate effects that affect on material property such as yield stress was evaluated quantitatively. Second, the static compression test was performed for two type of specimens, namely aluminum alloy column with uniform section and that filled with mortar partially. Third, the push-up impact test was executed and external force conditions such as push-up velocity and forced displacement are investigated. Finally, a dynamic critical stress formula is proposed by introducing strain rate effects into static formula, and it is shown that the proposed formula can estimate the dynamic local buckling load obtained by push-up impact test fairly well.

Key Words : aluminum alloy column, dynamic local buckling, strain rate effects, high-speed tensile test, static compression test, push-up impact test

1. 緒 言

先の兵庫県南部地震 (1995.1.17) の被害形態は、それまでの概念をくつがえすものであり、その一つとして鉛直地震動の影響が被災者のレポート^{1),2)}に多くなされたことや、破壊形態がいわゆる衝撃破壊に似ている特殊な例も散見され、衝撃的地震動を検討すべきとの意見も多く見られた^{3),4)}。これを踏まえて、地震動自体の観測の再検討^{5),6)}やRC橋脚柱の輪切り状ひび割れ破壊を対象とした研究^{7)~10)}などがある。さらに、鋼管橋脚柱の軸対称局部座屈現象を衝撃的鉛直動によって説明しようとする研究^{11)~13)}も行われてきた。ただし、この鋼管橋脚柱の軸対称局部座屈現象については、従来の水平地震動によって説明が可能とする研究も多く行われた^{14)~18)}。特に中村¹⁹⁾は、阪神高速神戸3号線 P-584 橋脚 (海側) の実橋脚を例として、実測地震波を用いた FEM 解析によって局部座屈変形を再現シミュレートが可能であることを示した。また、依田ら²⁰⁾は、衝撃解析汎用コードを用いて同橋脚に対する上部構造の落下衝突説によるシミュレーション解析を試み、座屈発生箇所が異なることを指摘している。このような検討の結果、鋼管橋脚の局部座屈については、水平地震動の方が主たる支配要因と考えられるようになっている²¹⁾。

しかし、最近の鳥取県西部地震 (2000.10.6) では土

木学会の調査委員が 1G を超える鉛直動の観測値が残されていたことを報告する²²⁾など、新しい知見も得られ、鉛直地震動の影響を無視すべきではなく、その影響をどのように検討すべきか新しい模索がなされている。

鉛直地震動の影響を不明確にしている一因として、土木分野では衝撃的荷重を受ける鋼管構造の軸対称座屈に関する基礎的研究が少ないことが考えられる。衝撃的荷重を受ける鋼管構造の応答を明らかにすることは、近年着目されている落橋防止緩衝構造への応用²³⁾なども考えられ、まずは基礎的な構造モデルで慎重な検討を行っておくことが重要と思われる。

そこで本研究では、鋼管柱の動的局部座屈を解明するための準備段階として、アルミニウム合金管柱をモデル供試体とした衝撃圧縮局部座屈発生に関する基礎的検討を行ったものである。衝撃的荷重の設定背景としては、過去にアルミニウム材で座屈再現に成功した奥田ら¹¹⁾の研究を参考に、下方向から突き上げ力を与えるものとした。そのうえで、衝撃的突き上げ荷重の速度や載荷時間 (変位) の局部座屈発生の臨界条件を求めた。これより局部座屈発生条件は、上部重錘の慣性圧縮力が鋼管の動的ひずみ速度効果を考慮した座屈強度を超えることによって支配されるを明らかにしたものである。

なお、本研究での「衝撃的」とは、ひずみ速度が 10^{-1}s^{-1} 程度の領域であるが、土木分野の衝撃問題の

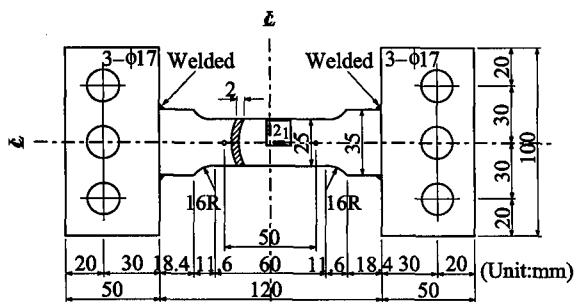


図-1 引張試験片の形状・寸法

範囲にある²⁴⁾ ことに鑑みて使用するものである。

2. アルミニウム合金管素材の高速引張試験

2.1 試験概要

アルミニウム合金の高速変形特性に関しては、既往研究²⁵⁾ もあるが、本研究の衝撃突き上げ実験とひずみ速度が異なることや供試体としたアルミニウム合金管素材とは異なるのでその材料特性を確かめる。

本研究で用いたアルミニウム合金管は、JIS H 4080 (アルミニウム合金継目無管) の押出管 (A6063TE-T1) である。JIS Z 2201 (金属材料引張試験片) の 12B 号試験片に規定に基づき、原管の管軸方向より試験片部を採取し、切削加工により 図-1 に示す形状に製作した。試験片部の主要な寸法は、幅 25mm、標点距離 50mm、平行部の長さ 60mm、肩部の半径 16mm、厚さ 2mm である。試験片 (全長: 120mm) の両端には、熱影響を最小限に抑えるため、最小脚長の溶接によりつかみ部を溶接した。

(1) 試験方法と計測項目

引張試験は、サーボ制御式急速載荷装置²⁶⁾ (最大荷重容量: 980kN, 最大載荷速度: 4m/s) に引張載荷装置²⁶⁾ を組み込んで行った。試験片は、つかみ部を M16 ボルト 3 本で鋼製の取付治具に固定し、さらに、軸方向の荷重のみを作用させるために取り付け上下のボールジョイントを介して引張載荷装置に固定した。試験に際しては、遊びによる衝撃力の混入と試験片の曲げを回避するため、初期引張力 (約 2kN) を負荷してなじませた後に載荷試験を行った。本試験では、載荷速度をパラメータとし、静的 (引張速度 $v \div 10^{-4}$ m/s, ひずみ速度 $\dot{\epsilon} \div 10^{-4}$ s⁻¹)、低速 ($v \div 4 \times 10^{-2}$ m/s, $\dot{\epsilon} \div 10^{-1}$ s⁻¹)、中速 ($v \div 3 \times 10^{-1}$ m/s, $\dot{\epsilon} \div 10^0$ s⁻¹) と高速 ($v \div 4$ m/s, $\dot{\epsilon} \div 10^1$ s⁻¹) の 4 種類に設定した。各載荷速度に対して 3 片の試験を行った。

計測項目は、試験片に作用する荷重と試験片のひずみである。試験片に作用する荷重は、ロードセル (荷重容量: 98kN, 固有振動数: 11kHz) で計測した。試験片には図-1 に示すように、2 軸箔塑性ひずみゲージ (ゲージ長: 5mm, ひずみ限界: 約 10~15%) のゲージ

線の交点が試験片の中心軸の中央に一致するように貼付した。各センサーからの出力は動ひずみ測定器 (最大応答周波数: 500kHz) で増幅した後、A/D 変換器により載荷速度に応じて 10ms~0.1μs 間隔にデジタル化して保存した。

(2) 試験結果

各載荷速度の 3 片の試験片に実施した引張試験の結果、試験片は全て標点外で破断 (C 破断) し、伸びは約 4~9% と JIS H 4080 の規格値 (12%) を下回った。これは、つかみ部の溶接による熱影響で破断部近傍の母材の機械的性質が劣化した²⁷⁾ ためと考えられる。引張強度は、静的で 122MPa となり、規格値 (120MPa) を上回っている。よって、溶接による熱影響は試験片のつかみ部近傍に限定されたと考えられる。

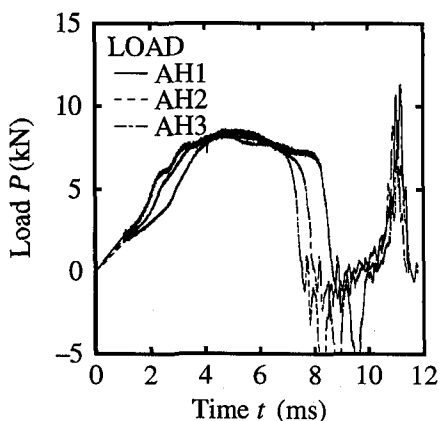
計測値の一例として、図-2 に高速載荷の 3 片の試験片の荷重とひずみの時刻歴を示す。図-2(a) より、3 片の試験片の荷重とも最大値 (引張荷重) がほぼ一致し、またそれらの増減の時間的変化も概ね一致しており、再現性が概ね確認される。図-2(b) より、3 片の試験片とも載荷初期の約 3ms まではひずみの立ち上がりが緩慢であるが、3ms 以降はひずみ速度が概ね一定になる。この 2~3ms 以降から最大ひずみ点までの勾配でひずみ速度を評価することとする。ちなみに、ひずみのデータも 3 試験片とも良く揃っており、塑性域の局所化などの影響はあまりないと思われる。ただし、この最大ひずみ点ではひずみゲージが剥離している。

各載荷速度の試験片に対する降伏点近傍の公称応力~ひずみ関係の一例を図-3 に示す。図中、縦軸はロードセルによる荷重の計測値より求めた公称応力、横軸は図-2(b) に例示した最大ひずみ点までのひずみを示し、最大値までは各載荷速度の試験片のひずみ速度を併記した。一般に、アルミニウム合金材では明確な降伏点のない Round-House 型の応力~ひずみ関係となるため、0.2% off-set 法で求めた耐力を降伏応力と定義している²⁷⁾。各載荷速度の試験片の応力~ひずみ関係の差異は、静的から中速までは僅少であるが、中速から高速にかけては急激に増大する傾向を示し、降伏応力の急激な上昇が認められる。縦弾性係数は、既往研究²⁵⁾ と同様に本試験においても載荷速度に影響されなことがわかる。各載荷速度に対する 3 片の試験片について実施した引張試験結果の平均から、縦弾性係数は約 70.8GPa である。

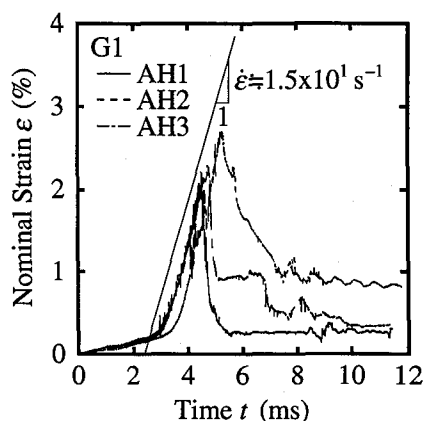
後述する 3.2 (4) で述べるように、本研究のアルミニウム合金管柱の局部座屈強度の支配要因は降伏強度と考えられるので、降伏応力のみ限定してひずみ速度効果を考察する。

2.2 降伏応力のひずみ速度依存性

各載荷速度に対する 3 片の試験片について実施した引張試験より得られた降伏応力を静的載荷時の 3 片の



(a) 荷重



(b) 軸方向ひずみ

図-2 高速載荷時の荷重と軸方向ひずみの時刻歴

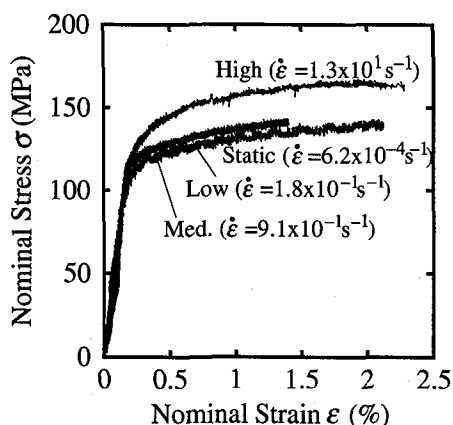


図-3 各載荷速度における応力～ひずみ関係の比較

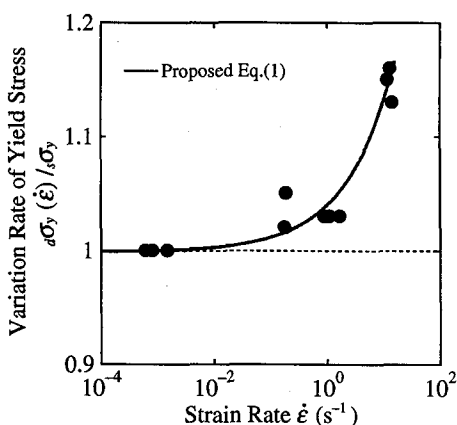


図-4 降伏応力変化率～ひずみ速度関係

試験片の降伏応力の平均値 $s\sigma_y \approx 122\text{MPa}$ で除して求めた降伏応力変化率 $d\sigma_y(\dot{\epsilon})/s\sigma_y$ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係は図-4 のようになる。一般に、アルミニウム合金材のひずみ速度効果は鋼材に比較して顕著でないことが知られている²⁵⁾。本試験でも同図に示すように、降伏応力変化率は $\dot{\epsilon} \leq 10^0\text{s}^{-1}$ までは緩慢に上昇し、 10^0s^{-1} を超えてからは $\dot{\epsilon} \approx 10^1\text{s}^{-1}$ で約 1.15 まで急激に上昇

しているが、鋼材の降伏応力変化率²⁸⁾ に比し小さくなる結果となった。しかし、文献²⁵⁾ では、明示されていない 10^1s^{-1} の領域でも 1.15 倍になっている。そこで、鋼材で使用されている式²⁸⁾ を参考にして、本試験での降伏応力のひずみ速度依存性を次式で定式化した。

$$f(\dot{\epsilon}) = \frac{d\sigma_y(\dot{\epsilon})}{s\sigma_y} = 10^{a_1 \log \dot{\epsilon} + b_1} + c_1 \quad (1)$$

ここに、

$$a_1 = 0.510, b_1 = -1.39, c_1 = 1.00$$

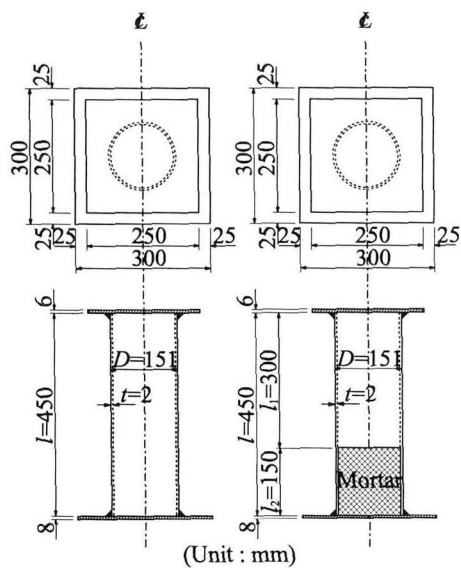
であり、式(1)の適用範囲は実験データを内挿するひずみ速度 $\dot{\epsilon} \leq 1.5 \times 10^1\text{s}^{-1}$ の範囲となる。

3. アルミニウム合金管柱の静的圧縮実験

衝撃突き上げ実験の参考とするため、アルミニウム合金管柱の静的圧縮実験を行った。

3.1 供試体および計測項目

供試体は、図-5(a)に示す外径 $D=151\text{mm}$ 、管厚 $t=2\text{mm}$ 、長さ $l=450\text{mm}$ のアルミニウム合金管柱（径厚比： $D/t=75.5$ 、径長比： $l/D=3.0$ ）と図-5(b)に示すアルミニウム合金管柱にモルタルを下端より 1/3 まで充填したものの 2 種類である。参考までに、供試体寸法は被災鋼製円筒橋脚 P-584 海側¹⁹⁾ の約 1/15 の縮尺となっている。ただし、材料的な相似性については完全には成立していない。モルタル充填柱は、被災橋脚の橋脚基部に車両等の衝突時の変形防止を目的とした中詰めコンクリートが充填されている場合を模擬したものである。管種は、JIS H 4080 の A6063TE-T1 である。供試体には、両端縁を完全固定とするために上下にそれぞれ板厚 6mm と 8mm のアルミニウム合金板（材質：JIS H 4000 の A6061P-T4）を溶接接合している。



(a) without Mortar (b) with Mortar

図-5 供試体の形状・寸法

表-1 供試体の材料定数

	Specimen	Plate
Material	A6063TE-T1	A6061P-T4
$E(\text{GPa})$	70.8	70
ν	0.33	0.33
$\sigma_y(\text{MPa})$	122	110
$\rho(\text{kg/m}^3)$	2690	2690

供試体の材料定数を表-1 に示す。ただし、表中の Plate とは供試体の上下部に溶接したアルミニウム合金管板の材料定数（公称値²⁷⁾）である。

計測項目を図-6 に示す。荷重と変位はそれぞれ圧縮型ロードセル（定格容量：490kN）とひずみゲージ式変位計（定格容量：200mm）で計測した。供試体の表面の軸ひずみは、供試体の上端より 29mm 下、中央部と供試体の下端より 29mm 上の円周上の载荷装置に向って正面と裏面の2箇所に貼付した塑性ひずみゲージ（ゲージ長：2mm、ひずみ限界：約 10～15%）によって計測した。

3.2 実験結果

(1) 静的局部座屈モード

写真-1(a) と (b) にそれぞれアルミニウム合金管柱（ $\delta=4.9\text{mm}$ 時）とモルタル充填柱（ $\delta=4.8\text{mm}$ 時）の局部座屈状況を示す。これらより、両者とも上端より約 17mm 下の断面に環状の軸対称局部座屈波形が発生していることが確認される。

(2) 軸ひずみ～変位関係

図-7 にアルミニウム合金管柱の軸ひずみ～変位関係を示す。同図より、局部座屈発生部に近い供試体の上

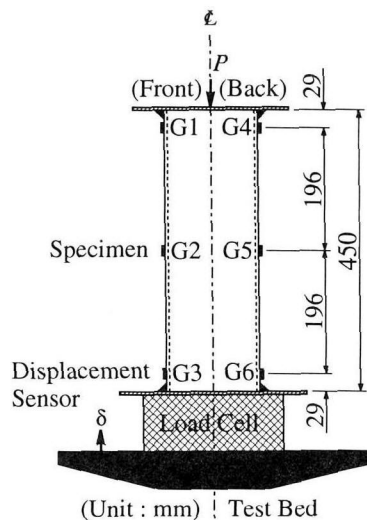


図-6 計測項目（静的圧縮実験）

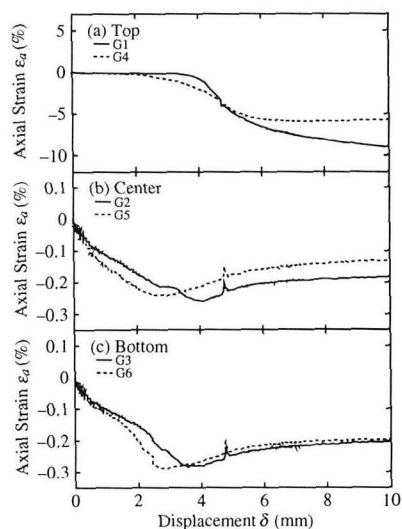
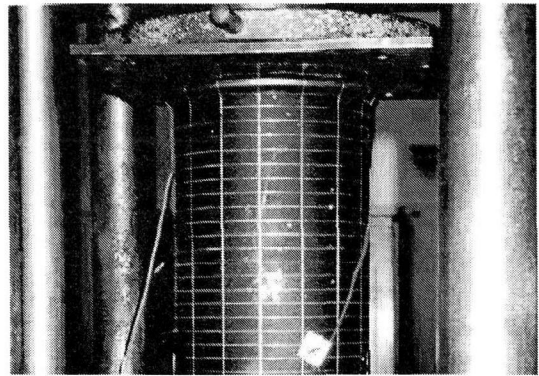
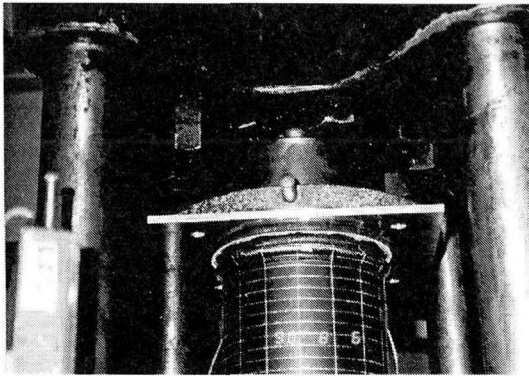


図-7 軸ひずみ～変位関係（アルミニウム合金管柱）

部の軸圧縮ひずみ（G1,G4）は、(3) で後述する公称ひずみによる局部座屈発生ひずみ（ $\epsilon_L \div 0.56\%$ ）よりも大きなひずみになっており、局部座屈の直上付近にゲージを貼付したため表面のひずみは大きくなったことがわかる。なお、 ϵ_L の値は後述の図-8(a) の局部座屈発生時の変位 $\delta_{cr} \div 2.5\text{mm}$ を柱長 $l=450\text{mm}$ で割った値である。しかし、中央部（G2,G5）や下部（G3,G6）では 0.56% より小さく、局部座屈が発生していないことが検証される。

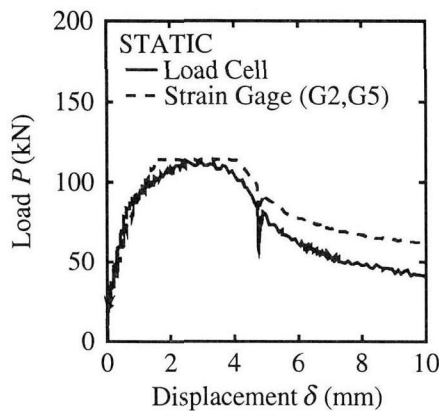
(3) 荷重～変位関係

図-8(a) と (b) は、それぞれアルミニウム合金管柱とモルタル充填柱の静的圧縮実験における荷重～変位関係を示したものである。図中、実線はロードセルによる計測値、点線は供試体中央部の軸ひずみ（G2と G5）の平均値に軸剛性を乗じて換算される軸圧縮力を示す。

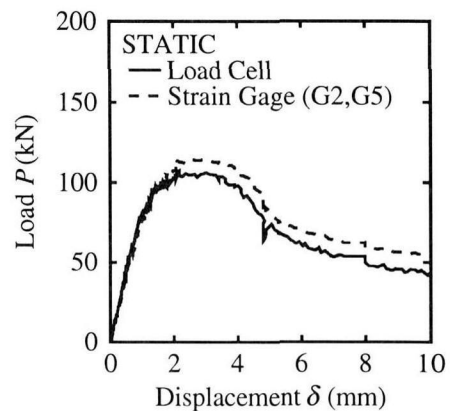


(a) 上端で発生した環状の軸対称局部座屈波形（アルミニウム合金管柱： $\delta=4.9\text{mm}$ ）
(b) 上端で発生した環状の軸対称局部座屈波形（モルタル充填柱： $\delta=4.8\text{mm}$ ）

写真-1 静的局部座屈モード



(a) アルミニウム合金管柱



(b) モルタル充填柱

図-8 荷重～変位関係（静的圧縮実験）

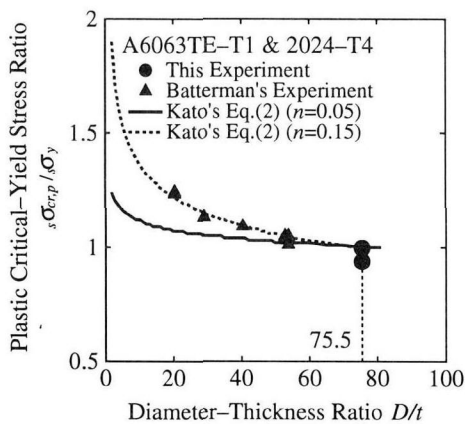


図-9 静的塑性局部座屈強度～径厚比関係

図-8(a) のアルミニウム合金管柱の場合、ロードセルによる計測値（実線）では、第 1 波の局部座屈波形が発生する座屈荷重は $sP_{cr,p} \div 114\text{kN}$ 、座屈変位は $s\delta_{cr} \div 2.5\text{mm}$ であり、ひずみゲージ（G2 と G5）にから換算した値（点線）でも、 $P_{cr} \div 114\text{kN}$ 、 $\delta_{cr} \div 2.5\text{mm}$ となる。一方、図-8(b) のモルタ

ル充填柱の場合では、ロードセルによる計測値は $sP_{cr,p} \div 107\text{kN}$ 、 $s\delta_{cr} \div 2.2\text{mm}$ 、ひずみゲージから換算した値は $P_{cr} \div 114\text{kN}$ 、 $\delta_{cr} \div 2.6\text{mm}$ となる。ひずみゲージから換算した座屈荷重の値は、ロードセルによる計測値と概ね良く一致する。したがって、衝撃突上げ実験時（ロードセルを使えないので）においても、波動の伝播速度（ $c \div 5130\text{m/s}$ ）から縦波の伝達時間が約 $8.8 \times 10^{-5}\text{s}$ であることを考慮して、ひずみゲージ（G2 と G5）から換算した荷重の値を供試体に作用する軸圧縮力の評価に用いても差し支えないものと考えられる。

(4) 静的局部座屈強度の算定式

さて、本供試体の径厚比（ $D/t=75.5$ ）は、例えば Batterman²⁹⁾ によれば $D/t < 120$ の範囲内の塑性局部座屈領域にある。加藤ら³⁰⁾ は変形理論による理論解をアルミニウム合金管と同様に Round-House 型の応力～ひずみ関係を有する残留応力を含む鋼管の塑性局部座屈荷重の実験結果に対応させ、次式に示す静的塑性局部座屈強度の実験式を導いている。

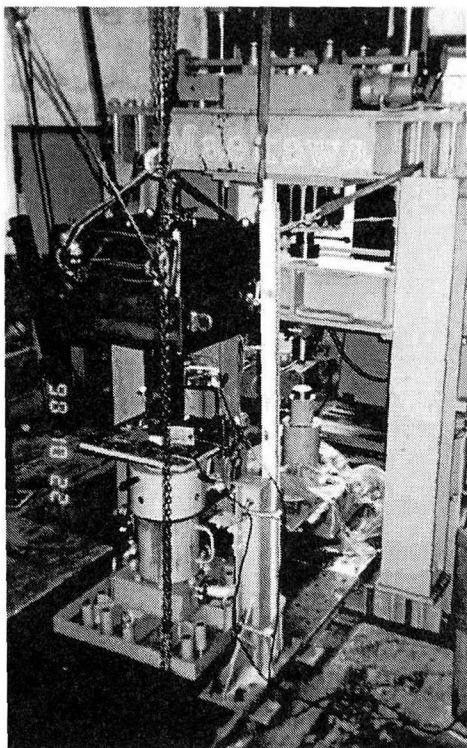


写真-2 衝撃実験装置の概要

$$\frac{s\sigma_{cr,p}}{s\sigma_y} = \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{\sqrt{n}}{0.002 + s\sigma_y/E} \cdot \frac{1}{D/t - 1} \right)^n \quad (2)$$

ここに、 $s\sigma_{cr,p}$: 静的塑性局部座屈強度、 $s\sigma_y$: 静的降伏応力、 n : 降伏以後の応力～ひずみ関係をべき関数で近似したときのべき数である。

図-9 に式 (2) による予測値と Batterman の実験値および本実験値を比較して示す。式 (2) では、 $D/t=75.5$ の場合、座屈強度は静的降伏応力の 1.003 倍となる。すなわち、ほぼ静的降伏応力と等しいこととなり、本実験結果も推定通りとなっている。

4. アルミニウム合金管柱の衝撃突き上げ実験

4.1 実験装置および供試体

写真-2 および図-10 に衝撃突き上げ実験装置の概要を示す。この装置は、図-10(a) の高速変形負荷装置と図-10(b) の突き上げ装置を併用して、鉛直下方向から供試体を強制変位させることにより衝撃的上下動を模擬するものである^{7),9)}。高速変形負荷装置は、最大 4m/s の一定速度で最大荷重容量 490kN、最大変位量 150mm まで荷重する能力を有している。突き上げ装置は、高速変形負荷装置から入力される力を入力側アクチュエータで受け、荷耐力伝達ホースを介して油圧で出力側アクチュエータに伝達し、突き上げ板上の供試体を衝撃的に突き上げ、その後、出力側アクチュ

エータ内のアルミニウム合金製ストッパーにより強制的に停止させる機構となっている。このため、荷重過程は、突き上げ板が上昇する加速領域と急停止した後の停止領域に区分される。入力側アクチュエータと出力側アクチュエータのピストン断面積比は約 1/3 であるため、理論上の最大突き上げ速度は約 1.4m/s、最大突き上げ強制変位量は 50mm となる。

供試体は、図-5(a), (b) に示す静的実験で用いたものと同一である。この供試体を M10 ボルトにより下部アルミニウム合金板を突き上げ板に固定している。上部アルミニウム合金板には、上部工を模擬して図-10(b) に示すように四角柱型の重錘（重量：約 10kN）を上載した。表-1 の供試体の降伏応力から算定した軸力比 (P/P_y) は 0.09 である。重錘と上部アルミニウム合金板とは、重心を一致させるためのガイドボルトを通して、両者間に固定軸力は働かない。

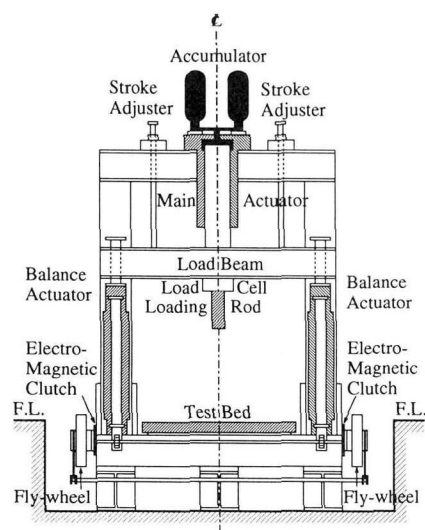
この装置を用いて、入力速度を 3 段階、つまり低速 (0.5m/s)、中速 (0.8m/s)、高速 (1.4m/s) に変化させると共に、強制変位も 2 段階、つまり $u=10\text{mm}$ と 20mm に変化させた。この強制変位の意味は、例えば $u=10\text{mm}$ まで急速に突き上げるが、 10mm になると取り付け板（基盤）が急停止する仕組みになっている。このため、突き上げ後の急停止により、重錘が飛び上がり重錘の落下により再び供試体に衝突し、その際局部座屈が発生または拡大することも推定された。参考までに、兵庫県南部地震では 0.4m/s 程度の鉛直方向最大速度が観測されている。

4.2 計測項目

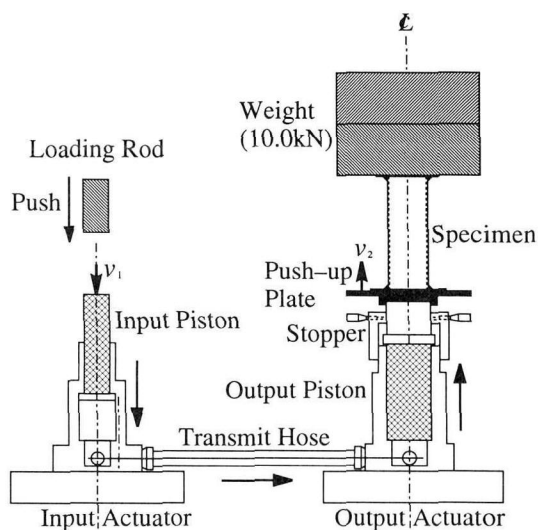
計測項目は、図-11 に示すように、加速度を下部アルミニウム合金板 (a_l)、上部アルミニウム合金板 (a_u) と重錘 (a_w) に取り付け加速度計により、また外部不動点から張り出されたレーザー式変位計により下部アルミニウム合金板 (u_l) と重錘 (u_w) の変位を計測した。供試体の表面の軸ひずみは、同図に示す位置に貼付したひずみゲージ (G1～G6) により計測した。これらのセンサーの動的応答特性を表-2 に示す。これらのデータは波形記憶装置でいずれの突き上げ速度でも、弾性限界までに 200 個以上のデータが得られるように 50～200 μs 間隔にデジタル化して保存した。以上の数値データの計測と並行して、撮影時間 1/2,250 秒の高速ビデオを用いた局部座屈発生過程の記録撮影を行った。

4.3 実験ケース

表-3 に示すように、アルミニウム合金管柱 (Uniform Section) と柱の下部より 1/3 までモルタルを充填した変断面柱 (Changed Section) の 2 種類の供試体に対し、入力速度を 3 種類 (低速 0.5m/s、中速 0.8m/s、高速 1.4m/s) に変化させるとともに、突き上



(a) 高速変形負荷装置



(b) 突き上げ装置

図-10 衝撃実験装置の概要

表-2 センサー仕様概要（衝撃突き上げ実験）

Sensor	Type	Measuring Range	Specifications
Accelerometer	Piezoelectric	$\pm 500g$	Response Frequency : 10kHz
	Piezoelectric	$\pm 5,000g$	Response Frequency : 12kHz
Displacement Sensor	Visible Laser Beam	$\pm 100mm$	Response Frequency : 915Hz Resolution : $50\mu m$
Strain Gage	High Elongation	Strain Limit : 10~15%	Gage Length : 2mm
Hispeed VTR	IC Memory	2,250 Frame/sec	Pixels : 256×256 Memory : 64MB

表-3 実験ケース

$\begin{matrix} u(mm) \\ v(m/s) \end{matrix}$	without Mortar		with Mortar	
	10	20	10	20
0.5 (Low Speed)	UL10-1 (A) UL10-2 (A)	UL20-1 (A) UL20-2 (A)	CL10-1 (A) CL10-2 (A)	CL20-1 (A) CL20-2 (A)
0.8 (Medium Speed)	UM10-1 (B) UM10-2 (B')	UM20-1 (B') UM20-2 (B)	CM10-1 (B) CM10-2 (B)	CM20-1 (B) CM20-2 (B)
1.4 (High Speed)	UH10-1 (C) UH10-2 (C)	UH20-1 (C) UH20-2 (C)	CH10-1 (C) CH10-2 (C)	CH20-1 (C) CH20-2 (C)

[註] 括弧内の英字は、図-12 に示す局部座屈モードを表す、

げ変位を $u=10mm$ と $20mm$ の 2 種類に変化させ、各ケース 2 回ずつ合計 24 体の供試体を用いた。

4.4 実験結果および考察

(1) 局部座屈モードと局部座屈発生過程

本実験では、図-12 および写真-3 に示す 4 種類の局部座屈モードが現れた。なお、アルミニウム合金管柱 (U) とモルタル充填柱 (C) の局部座屈モードの差はほとんど見られず、局部座屈モードは突き上げ速度

(L, M, H) によって異なることが認められた。ここでは、これらを高速ビデオの観測結果から時刻歴区分と座屈モード別に局部座屈の発生過程を時刻歴区分と座屈モード別に模式的に表した図-13 を参照しながら説明する。

1) Type A (図-12(a), 写真-3(a))

Type A は、加速と停止の両領域を経て局部座屈波形が供試体のいずれの箇所にも発生しなかったモードで、低速 ($0.5m/s$) による全ての実験ケース、計 8 実

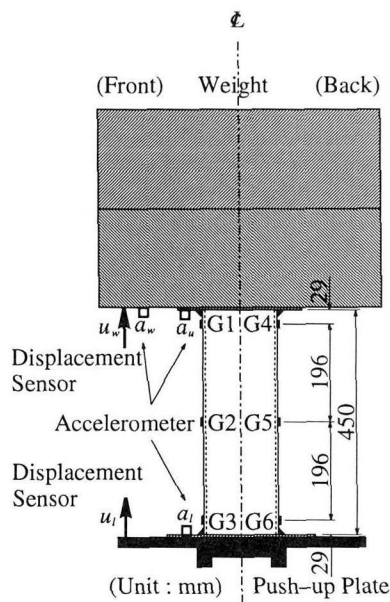


図-11 計測項目（衝撃突き上げ実験）

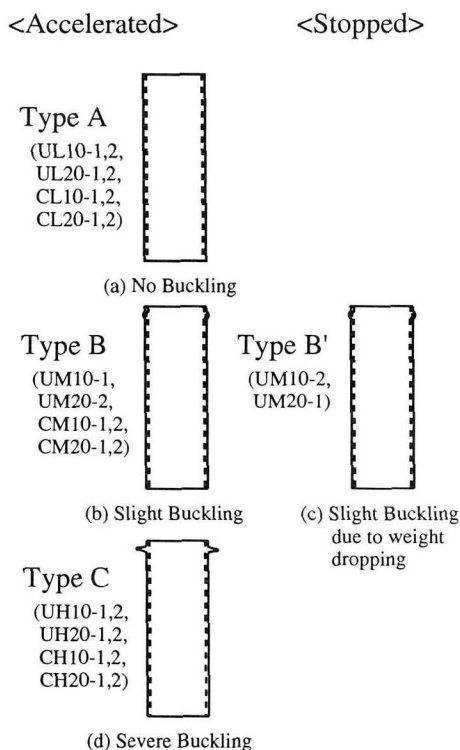


図-12 局部座屈モード（衝撃突き上げ実験）

験ケースで現れた。つまり、入力速度が遅い（0.5m/s）場合には、アルミニウム合金管柱とモルタル充填柱の別なく、静的局部座屈変位の約4～8倍の突き上げ強制変位量（10, 20mm）を与えても局部座屈が発生せず、よって、局部座屈発生に及ぼす突き上げ速度の影響が顕著であることがわかる。

2) Type B（図-12(b), 写真-3(b), 図-13(a)）

Type B は、加速領域で供試体の上端より約15～

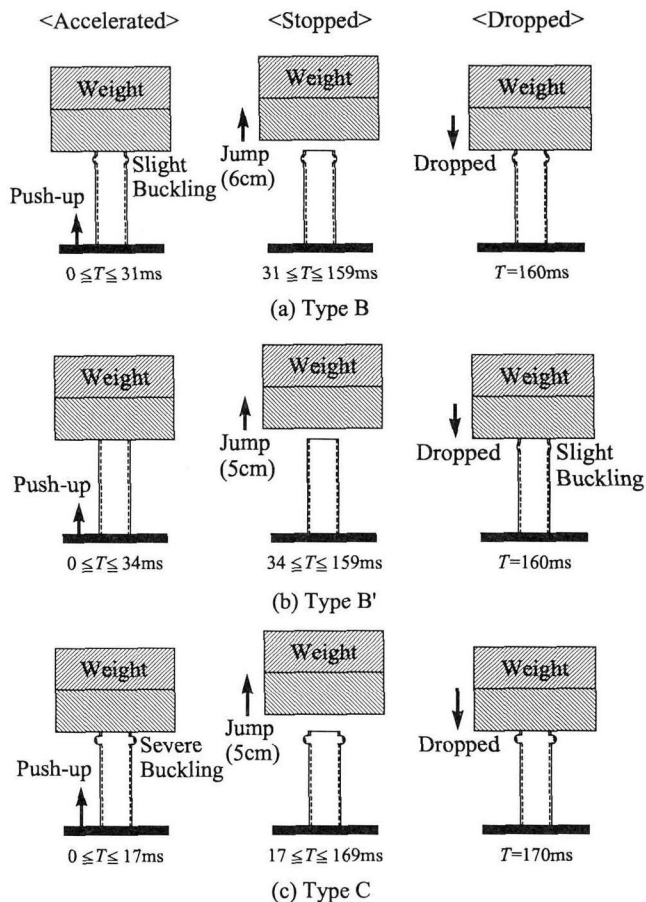


図-13 局部座屈発生過程（ T ：時間）

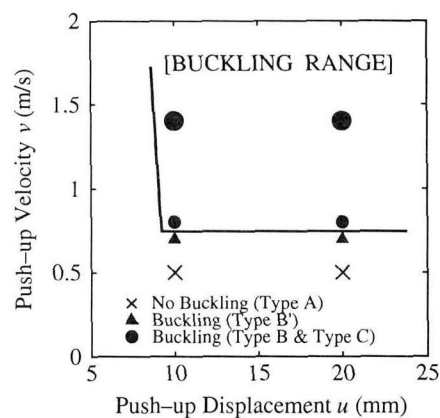
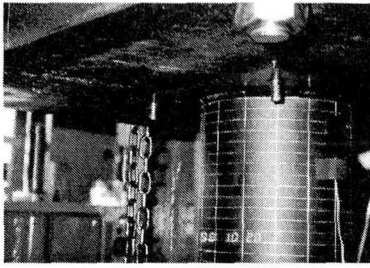
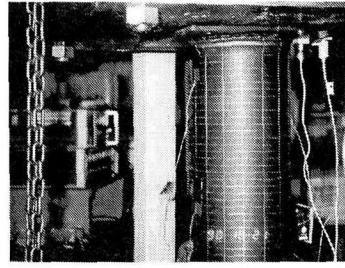


図-14 局部座屈の発生する外力条件の範囲

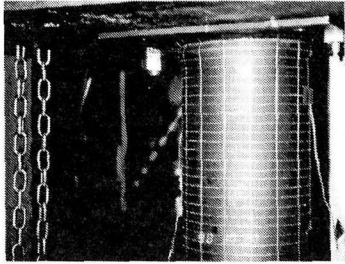
18mm 下の断面に明瞭な局部座屈波形が発生したモードで、中速（0.8m/s）で6ケースほど観測された。すなわち、突き上げ開始後に上部重錘の慣性力によって局部座屈波形が形成され、その後突き上げ板が停止すると上部重錘が供試体から離れて飛び上がり、落下衝突によって局部座屈波形が大きく進展する。ここで上端部近傍に発生した理由は、供試体の両端部が上下アルミニウム合金板と溶接されているが、下端部はボルトで完全に突き上げ板と固定されているため剛性が大



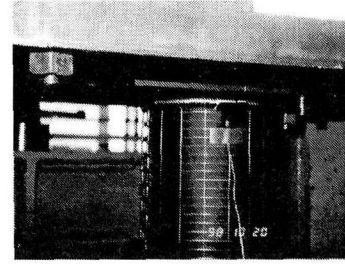
(a) Type A (UL20-2) : 加速, 停止の両領域で発生せず



(b) Type B (UM20-2) : 加速領域で発生した明瞭な環状軸対称局部座屈モード



(c) Type B' (UM20-1) : 停止領域での重錘の落下衝突により発生した環状軸対称局部座屈モード (加速領域では発生せず)



(d) Type C (UH20-1) : 加速領域で発生した極めて明瞭な環状軸対称局部座屈モード

写真-3 突き上げ実験時の局部座屈モード

きく、他方の上端部は重錘とボルトとが固定されずに通し穴で連結しているため（危険防止のため）曲げ剛性が下端部に比し小さく、上端部が座屈し易いためと思われる。また、モルタル充填柱の場合もアルミニウム合金管柱と同じ局部座屈モードとなったが、その理由は以下のとおりである。モルタル充填柱は下端より1/3点までモルタルを充填したが、その境界部における剛性の変化に比べ、上端部近傍の方が剛性の変化が大きいため同じ結果になったと考えられる。

3) Type B' (図-12(c), 写真-3(c), 図-13(b))

Type B' は、突き上げ速度の設定の微妙な差異により中速での速度がやや遅く（約 0.7m/s）なり。停止領域での重錘の上昇・落下衝突により供試体の上端より約 15~18mm 下の断面に局部座屈波形が発生したモード（加速領域では発生せず）で、アルミニウム合金管柱の UM10-2（変位 10mm, 2 本目）と UM20-1（変位 20mm, 1 本目、写真-3(c)）の計 2 実験ケースで観察された。

4) Type C (図-12(d), 写真-3(d), 図-13(c))

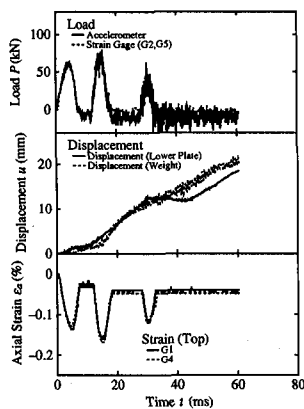
Type C は、加速領域で供試体の上端より約 15~18mm 下の断面に極めて明瞭な局部座屈波形が発生したモードで、高速（1.4m/s）での全ての実験ケース、計 8 実験ケースで観察された。つまり、入力速度が速くて（1.4m/s）ある程度の突き上げ強制変位量（10mm 以上）があれば、アルミニウム合金管柱とモルタル充填柱の別なく、このような極めて明瞭な環状局部座屈モードが発生することがわかる。

(2) 局部座屈の発生する外力条件

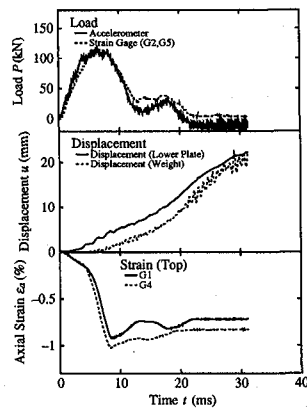
以上のモード区分を実験パラメータの突き上げ速度および突き上げ変位に比較して示すと、図-14 のようになり、明らかに突き上げ変位量に無関係に突き上げ速度約 0.75m/s を境にしてそれを超えると局部座屈波形が形成されることがわかる。これは、後述するように上部重錘の慣性力が動的局部座屈荷重を超えるためである。

(3) 荷重と変位の時刻歴応答

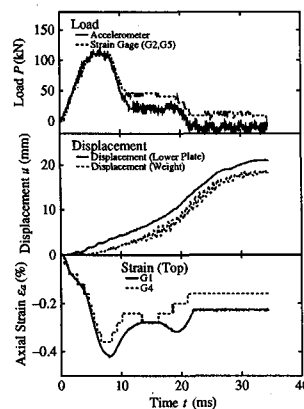
図-15 には、各座屈モードごとの中央ひずみ値（G2,G5）および上部重錘加速度から換算された重錘の慣性力、上・下端変位（ u_u, u_l ）と上部ひずみ値（G1,G4）の時刻歴を示す。ただし、図-13 で考察したように座屈発生は突き上げ直後の加速時に支配されるので、それぞれの加速領域の時間について示してある。加速領域の時間は各局部座屈モードに対してそれぞれ約 60ms, 約 32ms, 約 35ms と約 17ms となる。まず、上・下端の変位の時刻歴では、Type A の場合、時刻約 30ms までは上・下端の変位は一致しており、柱に極端な軸変形は生じていないことがわかる。約 30ms 以降では、上端変位の方が大きくなっており、加速領域の途中段階で重錘がはずれてやや飛び上がっているのがわかる。一方、他の Type B, B', C のケースでは、下端変位が突き上げの初期から明瞭に上端変位よりも大きくなっており、軸方向に短縮し、座屈が生じたことがわかる。ただし、図-15(b) と (c) の上端ひずみを見ると、Type B (図-15(b)) では、図-7 の場合と同様に約 8.5ms に約 1% に達した最大ひずみが復元すること無く維持されている。一方、Type B' (図-15(c)) では、最大ひ



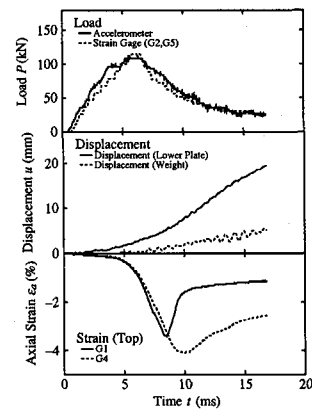
(a) Type A (UL20-2)



(b) Type B (UM20-2)



(c) Type B' (UM20-1)



(d) Type C (UH20-1)

図-15 荷重と変位の時刻歴応答 (加速領域)

ずみが約 0.4% と小さく、最大ひずみ後に 約 0.2% まで復元している。よって、Type B' は加速領域では局部座屈していないことがわかる。一方、この間の荷重を見ると、Type A の場合は何度か再打撃しているものの、他のケースでは一波の荷重波形である。また、そのピーク値を見ると、Type A だけが約 60kN と小さく、他のタイプはいずれも約 115kN とほぼ同じ大きさの荷重になっている。

(4) 動的荷重～相対変位関係

図-16 には、図-15 において、荷重～時間関係と下端変位 (u_l) から上端変位 (u_u) を差引いた相対変位量 ($\delta = u_l - u_u$) ～時間関係で同時刻における荷重と変位に同調して得られる動的荷重～相対変位関係を示す。比較のため、図-8 で示した静的な荷重～変位関係も示している。ここで、衝撃突き上げ実験は、供試体に重錘の自重 (約 10kN) による初期軸圧縮力が作用している状態から開始されるが、計測は衝撃突き上げ実験開始時を初期状態としているため、動的荷重には重錘の自重が含まれず、重錘が上載されない静的圧縮実験時の静的荷重とは供試体に作用する荷重の条件が異なっている。このため、両者の荷重条件が同一になるよう動的荷重に重錘の自重 (約 10kN) を付加して

いる。

図-16 より、Type A を除いて、座屈が発生した Type B, B', C のいずれの場合も概ね静的実験の場合とほぼ同様な曲線上にあるが、その最大値、つまり動的局部座屈荷重が静的局部座屈荷重よりやや大きいことがわかる。

そこで、静的な座屈耐力式に材料のひずみ速度効果を代入して予測が可能ではないかと考えられる。

(5) 動的局部座屈荷重の算定式

前項で述べたように、供試体上端で局部座屈が発生した Type B と C の動的塑性局部座屈荷重 $dP_{cr,p}$ の静的塑性局部座屈荷重 $sP_{cr,p}$ からの上昇は、載荷速度の増大に伴う材料特性の変化 (ひずみ速度効果) に起因すると考えられ、動的塑性局部座屈強度がひずみ速度効果により上昇することになる。ここでは、ひずみ速度効果を静的塑性局部座屈強度の算定式に導入することにより動的問題に対応し得るよう拡張を試み、動的塑性局部座屈強度の算定式の定式化を行う。

加藤ら³⁰⁾ の静的塑性局部座屈強度算定式 (式 (2)) は、静的降伏応力 σ_y からの耐力上昇率という形で与えられ、径厚比 D/t 、静的降伏応力 σ_y 、縦弾性係数 E とべき数 n の関数となっている。動的載荷の場合に

は、動的塑性局部座屈強度 $d\sigma_{cr,p}(\dot{\epsilon})$ と動的降伏応力 $d\sigma_y(\dot{\epsilon})$ とともにひずみ速度効果により増大するが、両者の比で表される上昇率の関数形として静的荷重の場合の式(2)が適用できると仮定する。すなわち、衝撃突き上げ実験時の動的塑性局部座屈強度算定式は、式(2)にひずみ速度効果を導入して動的問題に拡張すれば次式のように表される。

$$\frac{d\sigma_{cr,p}(\dot{\epsilon})}{d\sigma_y(\dot{\epsilon})} = f(D/t, E, s\sigma_y, n) \quad (3)$$

ここに、 $n=0.05$ である。

よって、式(2)と式(3)より、

$$\frac{d\sigma_{cr,p}(\dot{\epsilon})}{s\sigma_{cr,p}} = \frac{d\sigma_y(\dot{\epsilon})}{s\sigma_y} = f(\dot{\epsilon}) \quad (4)$$

となり、動的塑性局部座屈強度上昇率は降伏応力変化率に等しいひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関数として表されることになる。よって、本供試体の動的塑性局部座屈荷重 $dP_{cr,p}(\dot{\epsilon})$ は次式で与えられる。

$$dP_{cr,p}(\dot{\epsilon}) = A_d \sigma_{cr,p}(\dot{\epsilon}) = A_s \sigma_{cr,p} f(\dot{\epsilon}) \quad (5)$$

ここで、 $s\sigma_{cr,p}$ は式(2)を用い、 $f(\dot{\epsilon})$ は式(1)を用いる。

図-17 に、静的荷重実験と表-3 に示す全ての実験ケースにおける動的塑性局部座屈荷重～ひずみ速度関係を示す。図中、実線は提案式、●印と×印はそれぞれ加速領域で局部座屈が発生する場合としない場合の実験結果を示しており、Type B' (UM10-2, UM20-1) は発生しない場合(×印)に分類される。同図より、静的荷重時のモルタル充填柱の実験結果(▲印)は提案式の曲線を若干下回り、また、局部座屈の発生するかどうかの微妙な境界となる中速の突き上げ速度の場合に見られる Type B' の実験結果はほぼ提案式の曲線上にある。しかし、これらの微妙な実験ケースを除いた実験結果に対しては、局部座屈の発生する実験結果(●印)は全て提案式の曲線上にあり、一方、局部座屈の発生しない実験結果(×印)は全て提案式の曲線を下回っており、両者は明瞭に区分される。すなわち、提案式は本実験における局部座屈発生条件(発生するかどうかの判定)を概ね適切に表現できており、その妥当性が検証できたものと思われる。

5. 結 言

本研究は、アルミニウム合金管柱とモルタル充填柱の衝撃突き上げ実験を行い、局部座屈現象の実験的考察を試みたものである。本研究によって得られた成果を要約すれば以下になる。

1. アルミニウム合金管素材の高速引張試験より、材料特性におよぼすひずみ速度効果を確認すると

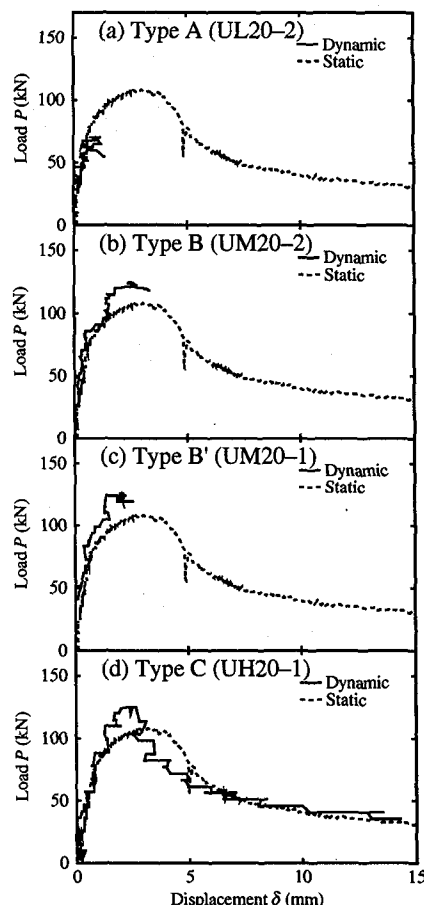


図-16 動的荷重～相対変位関係

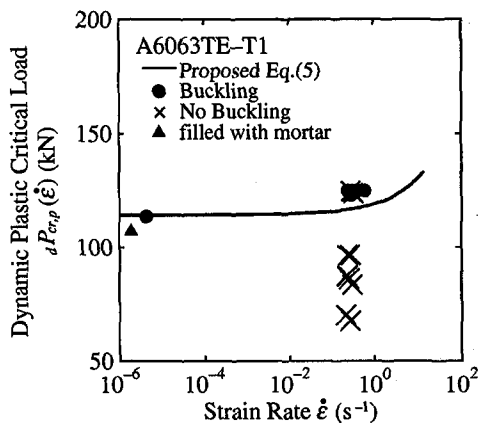


図-17 動的塑性局部座屈荷重～ひずみ速度関係

もに、降伏応力(0.2% off-set 耐力)のひずみ速度依存性を定式化した。

2. アルミニウム合金管柱とモルタル充填柱の静的圧縮実験より、両柱とも上端近傍で環状の軸対称局部座屈波形を得た。また、両者の座屈モードにおける差はほとんど認められなかった。
3. アルミニウム合金管柱とモルタル充填柱の衝撃突き上げ実験より、両柱とも突き上げ速度 $v \geq 0.75\text{m/s}$ および突き上げ強制変位量 $u \geq 10\text{mm}$ のとき、上

端近傍で軸対称局部座屈波形が現れた。

4. 衝撃突き上げ実験時の局部座屈の発生原因は、突き上げに伴って発生する重錘の圧縮慣性力に起因するものであり、局部座屈波形の進展度は、入力速度および突き上げ強制変位量が大きくなるほど顕著になることが認められた。
5. 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ことができ、衝撃突き上げ時の実験結果をほぼ良く推定できることが認められた。

なお、座屈発生に関するばらつき信頼度を上げるためには、より多くの実験を重ね、モルタル充填による座屈モードに差異が生じなかった点などについては、本実験結果をさらに詳細に検討するため、解析的にもシミュレーションを行う予定である。

謝辞： 本研究に当たっては、防衛大学校大野友則教授、藤掛一典講師と別府万寿博助手のご支援を受け、また上林勝敏研究員、濱野智史事務官、元防衛大学校第43期本科学士富永敦、佐藤敏裕両君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 園田恵一郎：阪神大震災における土木構造物の衝撃的破壊について、第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.327-336，1996.6.
- 2) 園田恵一郎，小林治俊，中島大使：地震による土木構造物の衝撃的破壊について，兵庫県南部地震における構造物の衝撃的破壊に関するシンポジウム，pp.37-44，1997.3.
- 3) 泉博充：見逃されている衝撃的上下動，土木学会誌，Vol.80，p.38，1995.11.
- 4) 高田直俊：「突き上げるような上下動」はどこへいった，土と基礎，44-3，pp.13-15，1996.3.
- 5) 清野純史：衝撃的地震動についての一考察，(続) 兵庫県南部地震における構造物の衝撃的破壊に関するシンポジウム，pp.107-116，2000.3.
- 6) 大野友則，井元勝慶：衝撃的地震動の計測記録における問題点，(続) 兵庫県南部地震における構造物の衝撃的破壊に関するシンポジウム，pp.117-123，2000.3.
- 7) 別府万寿博，香月智，石川信隆，宮本文穂：衝撃突き上げ装置によるRC橋脚模型の輪切り状ひび割れに関する実験的研究，土木学会論文集，No.577/I-41，pp.165-180，1997.10.
- 8) 大野友則，喜多龍一郎，藤掛一典：軸方向に衝撃力を受けるRC円柱試験体の圧縮破壊メカニズムに関する実験的研究，土木学会論文集，No.584/I-42，pp.229-242，1998.1.
- 9) 別府万寿博，香月智，石川信隆，宮本文穂：衝撃上下動を受けるコンクリート柱供試体の鋼板巻立て補強効果について，土木学会論文集，No.620/V-43，pp.215-231，1999.5.
- 10) 原田耕司，石川信隆，香月智，太田俊昭，日野伸一：下方からの衝撃力を受けるRC柱の波動場から振動場への移行状態に関する実験的研究，土木学会論文集，No.662/V-49，pp.135-148，2000.11.
- 11) 奥田洋一，園田恵一郎，高田直俊：高架橋橋脚モデルの線爆装置による衝撃破壊実験，土木学会第54回年次学術講演会講演概要集，I-B298，pp.592-593，1999.9.
- 12) 谷村眞治：兵庫県南部地震における構造物の衝撃的破壊について（破壊メカニズムに関する定量的検討），兵庫県南部地震における構造物の衝撃的破壊に関するシンポジウム，pp.61-68，1997.3.
- 13) 大野友則，水野淳，藤掛一典，河西良幸，喜多龍一郎：衝撃的地震動により鋼製橋脚に生じた局部座屈の発生メカニズムに関する研究，日本建築学会構造系論文集，第500号，pp.113-121，1997.10.
- 14) 水谷慎吾，宇佐美勉，青木徹彦，伊藤義人，岡本隆：パイプ断面鋼圧縮部材の繰返し弾塑性挙動に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.42A，pp.105-114，1996.3.
- 15) 井浦雅司，熊谷洋司，小牧理：横力と一定軸力を受ける円筒シェルの終局状態に関する研究，土木学会論文集，No.556/I-38，pp.107-118，1997.1.
- 16) 安波博道，寺田昌弘，青木徹彦，山田将樹：高張力鋼(SM570Q)鋼管柱の繰返し弾塑性挙動に関する実験的研究，土木学会論文集，No.591/I-43，pp.233-242，1998.4.
- 17) 井浦雅司，熊谷洋司，小牧理：繰返し横力を受ける円形鋼製橋脚の強度と変形能に関する研究，土木学会論文集，No.598/I-44，pp.125-135，1998.7.
- 18) 三木千寿，Jorge MÜLLER，佐々木哲也：断面変化部を有する円形断面鋼製橋脚の耐震性能の検討，土木学会論文集，No.605/I-45，pp.117-127，1998.10.
- 19) 中村秀治：鋼製円筒橋脚の動的弾塑性座屈解析，土木学会論文集，No.549/I-37，pp.205-219，1996.10.
- 20) 依田照彦，松尾礼子，榎田宗一郎，石川雅美，安藤浩平：鋼製橋脚の衝撃的地震動入力による局部座屈発生機構の検証，兵庫県南部地震における構造物の衝撃的破壊に関するシンポジウム，pp.87-92，1997.3.
- 21) 例えば，兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震による道路橋の震災に関する調査中間報告書（案），1995.3.
- 22) 清野純史：2000年10月6日鳥取県西部地震被害調査報告 1：地震の概要及び土木構造物関連，地震工学ニュース No.176，pp.2-7，2001.1.
- 23) 皆川 勝，高峯太一，土井雄司，藤谷 健：ゴム鋼併用型耐震緩衝装置をもつ免震橋の地震応答解析，鋼構造年次論文報告集，第9巻，pp.293-300，2001.11.
- 24) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，構造工学シリーズ 6，pp.35-36，1994.6.
- 25) 東 健司，向井敏司，海津浩一，土田 信，谷村眞治：実用アルミニウム合金の高速変形特性，材料，第39巻第447号，pp.1619-1624，1990.12.
- 26) 藤掛一典，篠崎敬一，大野友則，水野 淳，鈴木 篤：急速一軸圧縮荷重を受けるコンクリートのポストピーク挙動に関する実験的研究，土木学会論文集，No.627/V-44，pp.37-54，1999.8.
- 27) 軽金属協会：アルミハンドブック，5. 機械的性質，pp.29-49，1994.7.
- 28) 首藤誠志，松本憲幸，高橋芳彦，大野友則：高速荷重を受ける鋼材の動的応力～ひずみ関係モデル，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集，I-228，pp.486-487，1990.9.
- 29) Batterman, S. C.: Plastic Buckling of Axially Compressed Cylindrical Shells, *AIAA Journal*, Vol.3, No.2, pp.316-325, 1965.2.
- 30) 加藤 勉，秋山 宏，鈴木浩之：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，pp.9-17，1973.2.

(2001年9月14日受付)