

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560094

研究課題名(和文) 動的負荷を受ける金属および高分子複合材長柱の動的不安定挙動の解明

研究課題名(英文) Clarification of Dynamic Buckling Behavior of Long Columns Made of Metals and Composite Materials.

研究代表者

三村 耕司 (MIMURA, Koji)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70181972

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：柱状要素の負荷荷重に対する安定性は、構造物や機械要素にとって極めて重要な評価指標であり、その安全性の確保と密接につながっている。中でも、衝突や地震動によって引き起こされる、動的な負荷に対する安定性、すなわち動的座屈強度の推定・評価式は必要不可欠にも関わらず、これまで系統だって明らかにされてこなかった。本研究においては、このような動的座屈強度に及ぼす、負荷速度、柱の形状、大きさ、端末条件、拘束条件などの影響を、種々の実験を通して明らかにし、そのモデル化に成功した。

研究成果の概要(英文)：Dynamic stability of long columns is one of the most important problems in the field of the structure mechanics or mechanical strengths of materials. In this research, dynamic stability, namely, dynamic buckling strengths of long columns made of many engineering materials were investigated experimentally. From the series of systematic experiments, the effects of loading velocities, sizes of cross sections, lengths of bars, end conditions of both ends of bars and intermediate support conditions of long bars on the dynamic buckling loads were clarified, and practical equations to evaluate the dynamic buckling loads at arbitrary loading velocities were successfully formulated.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学, 機械材料・材料力学

キーワード：座屈荷重 動的負荷 衝撃負荷 細長比 静動比 モデル化 高速変形

1. 研究開始当初の背景

長柱部材は機械・構造物の一般的要素であるが、近年、材料の高強度化に伴って、断面積が小さく細長比の大きい長柱を使用することで軽量化・低コスト化を計ることが多くなっており、座屈問題の重要性が高まっている。

また、長柱を構成要素とする橋梁やタンク、鉄骨造建築物などは、東日本大震災等において、地震動に伴う変形現象のうち、座屈に起因する変形を多数生じ、その動的安全性の確保が急務であり、一方、エレベーターのガイドレールや緊急電流遮断装置の遮断棒などにおいても、衝撃負荷による座屈崩壊が問題となっている。これらのことから長柱の動的座屈に対する安全性の評価は重要な検討課題といえる。

動的座屈については、これまでも先駆的な研究が幾つか行われており、変形速度が上昇すると座屈荷重が増大することが知られているが、現在までのところ、動的座屈荷重を定量的に評価する実験式、ないし、理論式はまだ得られておらず、実際の設計では、実機と同様な条件での座屈試験による評価や、静荷重の場合と同様な Euler の座屈荷重による評価が用いられているのが現状である。

このような状況の下で、柱要素の動的不安定現象、中でも強度設計に密接に関係する動的座屈荷重の導出は、安全性の面から重要性が極めて大きい。

2. 研究の目的

前項に示したように、柱要素の動的座屈荷重の評価・解明は極めて重要な工学的課題であるにも関わらず、その系統だった解明はなされていない。そこで、本研究では

(1) 負荷速度の上昇に伴う座屈荷重の上昇が、どのような機構・メカニズムによるものか、高速ビデオカメラによる変形モードの画像解析、数値シミュレーションを援用したメカニズム解析を通して明らかにし

(2) 試験体の材料、断面形状、寸法、長さ、負荷速度等を変えた得られる一連の座屈試験の結果得られた動的座屈荷重のデータから、任意材料、形状寸法の柱要素の同手座屈荷重の実用評価式を構築し、その適用範囲について検証すること、

(3) 柱の座屈強度を向上させるために、静的負荷状態では多用される、端末条件の変更、中間拘束部の追加などの手法が動的負荷時においても有効な手段といなり得るか

の3つ点を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

前項「研究の目的」に一部記したように、項目(1)については、動的負荷時の柱には、静的負荷時に見られる一次モードを超える

たわみモードが発生しているものと推定できる。従って、本試験で導入した高速ビデオ撮像システムにおける動的負荷時の長柱の変形モードの画像解析を行うことで、高速負荷時の高次の座屈モードの発生の実態を明らかにすると同時に、数値計算より、同様のモードが再現できるかについて検討する。

項目(2)については、金属材料としてはアルミニウム合金(A7075)、高分子材としてはポリカーボネート(PC)、ガラスエポキシ材(GFRP)等の採用により、強度的には軟質な材料から高強度材までをカバーし、試験体の断面形状については、円形材、帯板材の2種類、試験片長さは300mm程度から1000mm強までの種々の試験体を用意し、これに準静的負荷速度(0.1mm/s)から3m/sの動的な負荷速度までの種々の変形速度を、油圧サーボバルブを利用した低速負荷装置(～1m/s、図1参照)と落錘式の高速負荷試験装置(1m/s～3m/s、図2参照)の2種類を用いて与え、種々のパラメタが動的座屈荷重に及ぼす影響を定量的に評価する。また得られた結果から、任意の負荷速度における、任意の形状・材質の柱状要素の座屈荷重の推定式(評価式)を構築する。

項目(3)については、試験体両端面と、中間部をエッジ支持(回転支持)或いは、固定式支持(回転拘束)することが可能な治具を新たに考案し、それを用いた試験を実施することで、高速変形に至るほど、端面の拘束条件は厳しくなり、ある速度以上では固定条件にした場合と座屈荷重が変わらなくなること明らかにする。

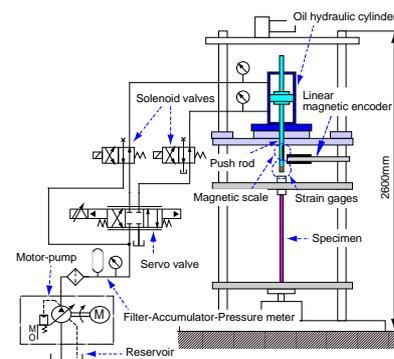


図1 油圧式低速負荷試験装置

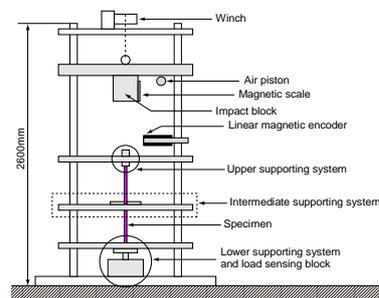


図2 落錘式高速負荷試験装置

4. 研究成果

本研究において得られた成果は以下に項目別に示す。

(1) 動的座屈荷重の上昇のメカニズム

図3は、長さ750mm、厚さ3mmのA7075製の帯板に動的負荷を作用させたときの座屈発生直後のたわみモードを高速ビデオカメラの解析画像を用いて示したものである。末端条件は固定条件とした。得られた結果より、動的負荷時には、準静的負荷で見られる1次モードのたわみではなく、より高次のたわみモード(2次~5次程度)が発生していることが確認できる。これは、動的負荷下では横慣性の存在のために、準静的負荷におけるような1次のモードの大たわみ変形で軸方向変位を生じさせることが困難となり、より高次のモードで、個々のスパンでのたわみ変形は小さくとも、試験体全体で必要な軸方向変位を生じさせる方が効率的な変形となるためであり、この負荷速度の増加に伴うたわみモードの高次化が負荷速度上昇に伴う座屈荷重増大の主たる原因であると考えられる。

また、このような動的現象の発現する速度は、本研究開始前の予想とは異なり、非常に低い速度域(図3では75mm/s)で、生じていることが分かった。このことは、現在、構造力学や材料力学で使われているEulerの座屈式が、極めて低速な負荷領域でしか成立し得ないことを示唆しており、動的座屈荷重の評価式の構築が極めて重要となることを示している。

次に、数値シミュレーションによる実験の再現を試みたところ、重錘、または、圧子側(衝撃端側)をわずかに(0.2~0.5度)傾けるか、試験体側面に微小な初期不整(1/100mm程度)を与えると、現実の試験での動的荷重-変位関係を良好に表せることが分かった。同様の解析条件の下では、動的負荷速度が1.5m/sで、直径10mm、長さ1000mmのアルミニウム柱では、動的負荷が作用した瞬間に極めて高次(30次)程度のたわみが発生し、応力波が柱中を繰返し往復する過程で徐々に減衰して、動的座屈発生直前には7~9次程度のたわみモードとなることが分かった。対応する実験での動的座屈荷重の静的座屈荷重に対する割合は40倍~70倍であるから、高次化した「たわみ長」が実質的な「柱長」に相当すると見なすと、実験結果での座屈荷重増大の定性的な説明が可能である。



図3 変形速度を上昇させた場合にA7075アルミニウム合金製帯板に見られた座屈モードの変遷。(a) 準静的負荷 (b) 変形速度 0.075m/s, (c) 変形速度 0.6m/s).

(2) 下限界速度と有効負荷速度の導入

柱の座屈荷重は、その断面寸法、長さと共に負荷速度によってもダイナミックに変化する。このため、座屈荷重に対する負荷速度依存性を論じるには、静的な負荷状態(=変形速度が無限に小さい)でのEulerの座屈荷重に対する実際の座屈荷重の割合、すなわち静動比()を用いることが最も妥当である。

静動比が1となるのは、前述の如く、理論的には負荷速度が無限小となる静的負荷時であるが、静荷重以外の現実の負荷では、そのようなケースはあり得ない。実質的には「準静的な変形速度」で、座屈荷重を左右する他の要因、例えば、幾何学的な初期不整や偏心等に比べて、慣性力の効果が充分小さく無視できる範囲では $\alpha = 1$ が成立するものと考えられる。このように、負荷速度が低下したとき、慣性力の効果が消失する速度限界を動的座屈効果が生じる「下限界速度: V_0 」と定義する。図4は厚さが3mmで、長さの異なる三種類の帯板状試験体に 0.0001~0.1m/sの範囲内の低速度負荷を与えた際の「静動比-負荷速度関係」を示したものである。

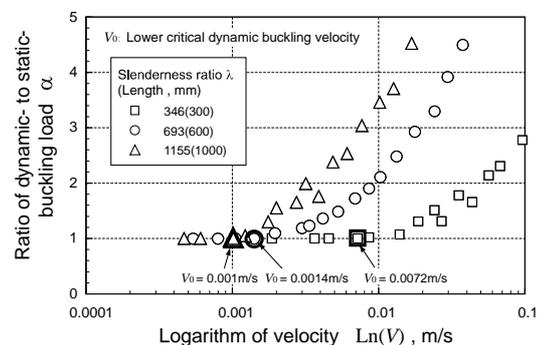


図4 長さの異なる帯板状試験体の静動比と負荷速度 V との関係

各試験体の静動比 α は負荷速度が 0.001~0.01m/s の範囲で概ね 1 に収束しており、図中に示した矢印の付近に「下限界速度 (V_0)」が存在することがわかった。この速度を超えると、試験体の形状に依存するが、 α は急速に増大して動的効果が現れる。この効果は相対的に細長い柱、すなわち細長比()が大きな柱ほど顕著であること、また、前述の V_0 も、細長比が大きく細長い柱ほど、より低速度で現れることが示されている。これは、細長比が小さな試験体ほど、曲げ変形が起こり難いため、慣性力が作用してもそれによるたわみモードの高次化が抑制されることが一因と考えられる。

図5は、図4に示した各試験体に対する下限界速度 V_0 を細長比 λ との関係で整理し直したものである。

V_0 と λ の間にはべき乗則の関係が示唆される結果となっており、本研究ではこれを、

$$V_0 = \mu \lambda^q \dots \dots (4-1)$$

なる関係として扱った。ここで、 μ (m/s) 及び q は係数であり、非線形最小二乗法により、

これらを同定すると $\mu=2.87 \times 10^2$, $q=-1.84$ となった。なお、図中の実線は、提案式による近似曲線であるが、実験結果を良く表現し得ていることが分かる。

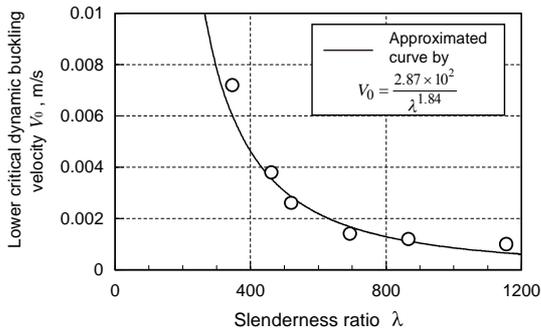


図5 下限界速度 V_0 と細長比 λ 間の関係

以上の様に、動的効果が発生する下限速度の定量評価が出来たことで、本研究では通常の負荷速度 V に変えて、有効負荷速度 (V_e) を $V_e = V - V_0$ (4-2) として定義し、低速度域での動的座屈荷重の表現の精密化を図る。

(3) 静動比の負荷速度及び寸法への依存性と動的座屈荷重の実用評価式の構築

図6は種々の寸法のアルミニウム帯板の静動比と有効負荷速度 V_e の関係を示したものである。図より静動比は、有効負荷速度及び細長比の増加に伴い上昇し、使用した試験装置試験装置の差異に無関係に、全試験速度領域で滑らかに増加することが分かった。また、有効負荷速度が同じであれば、細長比が大きな柱ほど静動比は大きくなること分かる。これは、(1)でも述べたように、細長く撓みやすい柱ほど、動的負荷による横慣性の拘束を受け易いことに起因するものと思われる。

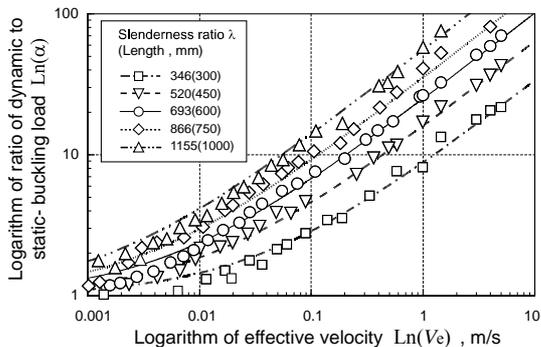


図6 長さ 300mm ~ 1000mm のアルミニウム試験体における $\alpha - V_e$ 関係とその近似曲線 ((4-3) 式)

次に、図6の関係をモデル化した実用動的座屈荷重評価式の構築を考える。座屈過程の数値シミュレーションにおいて、ヤング率 E が高く、密度 ρ が小さな材料ほど、動的変形時に高次たわみモードが発生しにくいことが分かっている。これは E が大きいほど曲げ剛

性が高くなり撓みにくくモードが低次すること、また ρ が小さいほど慣性力に依る柱の横方向への拘束力が小さく、たわみの高次化が起こりにくいことに起因するものであろう。この二つ量 E, ρ は、従って、相反する性質を持ち、これらの性質を単一パラメタとして表現し得る物理量として、応力波の伝播速度 $C = \sqrt{E/\rho}$ がある。従って、動的荷重の評価式中で、材料の違いによる挙動の差異を考慮するためには、伝播速度 C の評価式への導入が望ましい。一方、研究代表者らの事前研究において、細長比と静動比の間にはべき乗則の関係¹⁾が存在するため、本研究では実用動的座屈荷重評価式として、

$$\alpha = 0.124 \left(\frac{V_e}{C} \right)^{0.62} \lambda^{1.61} + 1 \quad \dots \dots (4-3)$$

を提案する。ここで各係数値は無次元量であり、材料に関わらない定数である。式(4-3)による近似曲線を図6中に実線、点線、一点鎖線、二点鎖線等で示した。近似結果は、0.001 ~ 0.01m/s の低速域で、実験値よりやや高めの評価となっているが、これは、試験体の初期不整(初期たわみ、あるいは、偏心)の影響で、実験値が低めに得られている可能性もある。また、慣性効果がすべての試験体で概ね支配的になる 0.01m/s 以上の速度域では、両者は良い一致を示すことが分かる。

また、細長比については、図7の特定の細長比(例として $\lambda=520$ の場合を示す)を持つ種々の試験体の静動比と有効負荷速度の関係が示す通り、断面形状や寸法が異なっても、同一の細長比を持つ長柱においては静動比は等しくなることが分かる。

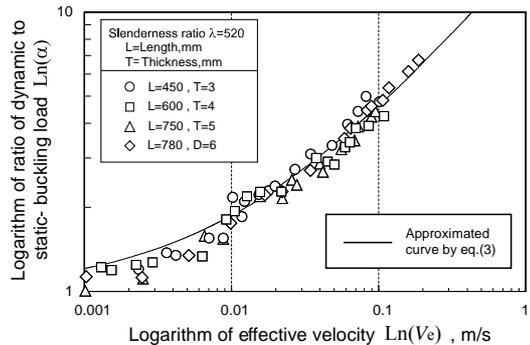


図7 $\lambda=520$ となる各種試験体の $\alpha - V_e$ 関係とその式(4-3)による近似曲線

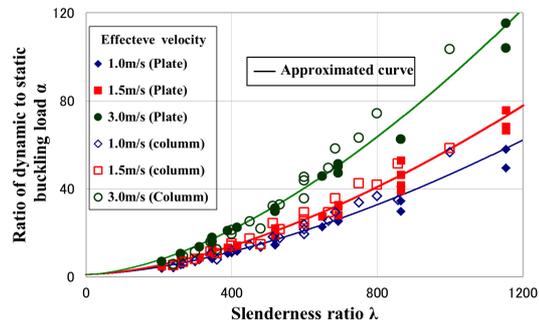


図8 ポリカーボネート材の $\alpha - V_e$ 関係とその近似曲線

さらに図8は高分子材(ポリカーボネイト)長柱の $-V_e$ を示したものである。PC材の弾性係数と密度はそれぞれ 2.2GPa, 1160kg/m³ で、アルミニウム材の弾性係数と密度(それぞれ 72GPa, 2780kg/m³)と大きく異なっているが、図中の近似曲線が示すとおり、式(4-3)による近似結果は良好で、伝播速度 C を式(4-3)の速度項の分母として導入し、有効負荷速度を無次元化したことで、材料間の座屈挙動の差異を吸収し得たものと考えられる。このように式(4-3)を利用すれば任意の素材で出来た長柱の動的座屈強度が精度良く、効率的に推定可能となる。

(4) 末端条件の動的座屈荷重に及ぼす影響前項までの結果は、長柱の両端が固定条件の場合の動的座屈挙動に関するものであった。一般的な機械、あるいは、構造物中の柱状要素の端部の多くは完全拘束されているため、その動的座屈荷重の推定には、式(4-3)の適用で十分な場合が多い。しかしながら、トラス構造の橋梁などでは、両端回転、一端固定他端回転などの条件での動的座屈荷重が問題となるケースが想定される。本項では、このような末端条件の違いが座屈荷重に及ぼす影響について検討した結果について示す。

図9はアルミニウム合金帯板(長さ600mm, 厚さ3mm, 幅10mm)について、末端条件が、それぞれ両端固定、一端固定他端回転、両端回転の場合に得られた動的座屈荷重と負荷速度の関係を示したものである。下限界速度(0.01m/s)付近では、両端回転条件の座屈荷重を基準として、一端固定-他端回転条件の座屈荷重は、そのおよそ2倍、両端固定条件の座屈荷重は4倍となり、Eulerの座屈荷重式に正確に沿う結果となっている。しかしながら、変形速度が下限界速度を超えるとまもなく、それぞれの条件での座屈荷重は変形速度とともに急速に増大しながらも、各条件での座屈荷重の差異は減少し変形速度1m/s辺りでは、ほとんど一致していることが分かる。このような現象は、動的負荷では、柱に高次モードのたわみが発生することで、座屈荷重が増大するため、変形速度が上がるほど高次モードへの端部の拘束条件の寄与

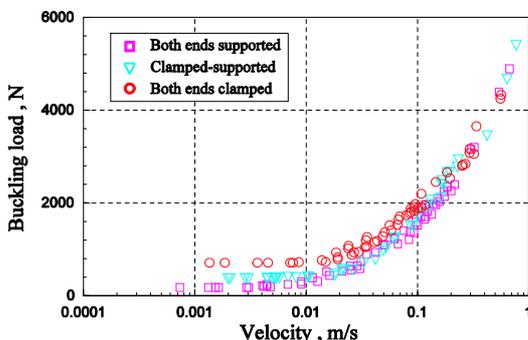


図9 両端固定、一端固定-他端回転、両端回転条件での動的座屈荷重の推移

が減少すること、また、端部が回転条件であっても、負荷速度が増大するほど横慣性に依る拘束が発生し、容易に回転できなくなり、端部条件が固定に近づくなどの原因が考えられる。これらの様子は、例えば両端回転条件を選べば、その座屈荷重を P_{SS} 、同じ負荷速度での両端固定条件の座屈荷重を P_{CC} としてその比 $\gamma_{SS} = P_{SS} / P_{CC}$ を有効負荷速度に対して示せば図10の様になり、 γ_{SS} は初期値 1/4 から 1.0 へ S 字状カーブを描いて漸近する。

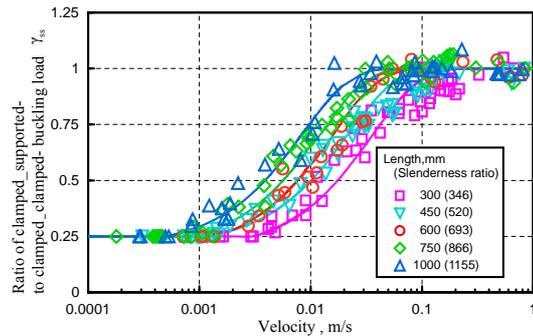


図10 負荷速度の上昇に伴う γ_{SS} の推移

同様に一端固定-他端回転条件での座屈荷重を P_{CS} とし、その P_{CC} との比を $\gamma_{CS} = P_{CS} / P_{CC}$ とすれば γ_{CS} は初期値 0.5 から 1.0 へ漸近する S 字カーブを描く。本研究ではこれらの比を次式のように表現することに成功した。

$$\gamma = 1 - \left(1 - \frac{k}{4}\right) e^{-130k^{-0.998} \left(\frac{V_e}{C}\right) \lambda^{1.20}} \dots\dots (4-4)$$

ここで、 k は末端係数を表し、両端固定条件では $k=4$ 、一端固定-他端回転条件では $k=2.046$ 、両端回転条件では $k=1$ となり、任意の末端条件での静動比は、式(4-4)を式(4-3)に掛けて

$$\alpha = \gamma \times \left(0.124 \left(\frac{V_e}{C}\right)^{0.62} \lambda^{1.61} + 1\right) \dots\dots (4-5)$$

とすることで得られる。

(5) 柱の中間拘束時の座屈荷重の評価動的座屈荷重の上昇が、高次たわみモードの出現によるものであるとするならば、静的負荷の Euler の座屈式を応用した、座屈抑えの概念は再考せねばならない。すなわち、高速度域では、高次モードのたわみで、たわみ長が細分されているため、柱の中間部を回転拘束 (= 固定) 或いは回転支持しても、そのたわみモードに本質的な差異は生じなくなると考えられるためである。前項(4)での扱いと同様に、両端固定条件で、柱の中央を回転拘束した場合の座屈荷重を \bar{P}_{CC} とし、中央部を拘束しない場合の座屈荷重との比、 $\zeta = \bar{P}_{CC} / P_{CC}$ を測定すると、図11のように下限界速度付近では、Eulerの座屈式から導かれるように、中央拘束時の座屈荷重は4倍となって $\zeta=4$ が得られる。しかしながら、異なる末端条件の場合と同様に、負荷速度が増大するにつれて ζ は 1 に逆 S 字曲線を描いて収

束するような挙動を示す。中央部を回転支持した場合は $\zeta = 2$ が初期値となり、負荷速度の上昇とともに、やはり1に収束する。

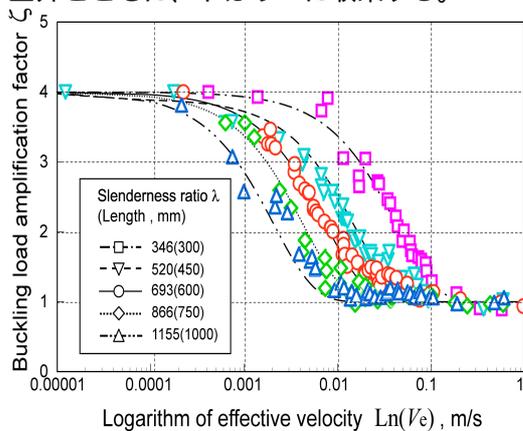


図 11 負荷速度の上昇に伴う ζ の推移

このような ζ の挙動を、本研究では以下のように表現することが出来た。

$$\zeta = (k-1) \exp\left[-5.41 \times 10^{-2} \left(\frac{V_e}{C}\right) \lambda^{2.51}\right] + 1 \quad (4-6)$$

ここで、 k は中間部を回転拘束(=固定)の場合に4、回転支持の場合には2.046をとり、端末係数と同じ定義である。

中間部を拘束または支持した場合の静動比は式(4-6)を式(4-3)に乗ずることによって

$$\alpha = \zeta \times \left(0.124 \left(\frac{V_e}{C}\right)^{0.62} \lambda^{1.61} + 1\right) \dots \dots \quad (4-7)$$

として求めることが出来る。

参考文献

1) K. Mimura, T. Umeda, I. Riku, M. Yu and Y. Uchida, The 9th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, vol.1, pp.741-747(2009).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

三村 耕司, 菊井 巧也, 西出 直弘, 榎田 努, 陸 偉, 橋本 裕明, 準静的 動的遷移速度域における両端および中間部を拘束された長柱の動的座屈挙動, 日本材料学会誌, Vol. 61, No. 11, pp.881-887 (2012), 査読有り

K. Mimura, T. Umeda and T. Kikui, Dynamic Elastic Buckling Criterion for Slender Columns and Plates under Intermediate Impact Velocity, Proceedings of International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011 (JSEM), p.90 (2011), 査読無し

[学会発表](計11件)

三村 耕司, 準静的から中速度域 (~1.0m/s)での GFRP 材および極薄アルミ合金板材の動的座屈荷重, 日本材料学会 第 63 期通常総会講演会, 2014 年 05 月 16 日 ~ 18 日, 福岡大学

山根 奨太 (三村 耕司), 薄板材の動的座屈挙動に関する検討, 日本機械学会関西支部 第 89 期定時総会講演会, 2014 年 03 月 18 日 ~ 19 日, 大阪府立大学

三村 耕司, 長柱の動的弾性座屈荷重に及ぼす負荷速度と端末支持条件等の影響, 第 57 回日本学術会議 材料工学連合講演会, 2013 年 11 月 25 日 ~ 26 日, 京都テルサ

西出 直弘 (三村 耕司), 端末及び中間拘束条件を変化させた場合の準静的 動的速度域における長柱の座屈挙動, 日本機械学会 関西支部 第 88 期定時総会講演会, 2013 年 03 月 16 日 ~ 17 日, 大阪工業大学

三村 耕司, 動/衝撃負荷下での構造体の不安定挙動, 日本機械学会 関西支部 第 88 期定時総会講演会 (招待講演), 2013 年 03 月 16 日 ~ 17 日, 大阪工業大学

三村 耕司, 静 - 動的遷移速度領域における長柱の座屈挙動, 第 56 回日本学術会議 材料工学連合講演会, 2012 年 10 月 29 日 ~ 30 日, 京都テルサ

三村 耕司, 遷移速度領域における長柱の動的弾性座屈挙動に及ぼす負荷速度 / 支持条件等の影響, 日本材料学会 第 61 期通常総会講演会, 2012 年 05 月 26 日 ~ 27 日, 岡山大学

菊井 巧也 (三村 耕司), 長柱体及び中間拘束した長柱体の動的座屈挙動に関する研究, 日本機械学会関西支部 第 87 期定時総会講演会, 2012 年 3 月 17 日, 関西大学

菊井 巧也 (三村 耕司) 長柱体及び中間拘束した長柱体の座屈挙動に及ぼす変形速度と細長比の影響, 日本材料学会 第 10 回材料の衝撃問題シンポジウム, 2011 年 12 月 22 ~ 23 日, 法政大学

菊井 巧也 (三村 耕司) 動的負荷時の長柱の座屈挙動に及ぼす試験体寸法と材質の影響, 日本実験力学学会 2011 年度 年次講演会, 2011 年 8 月 30 日, 奈良県文化会館

三村 耕司, 中間支持を含む長柱体の座屈荷重の変形速度依存性, 日本材料学会 第 60 期定時総会講演会, 2011 年 5 月 25 日, 大阪大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三村 耕司 (MIMURA Koji)
大阪府立大学・大学院 工学研究科・教授
研究者番号: 70181972

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし