

圧縮力と横方向の振動を受ける鋼構造トラス部材の共振時の 挙動に関する非線形数値解析

NONLINEAR NUMERICAL ANALYSIS FOR RESONANT BEHAVIORS OF STEEL TRUSS MEMBERS ON COMPRESSIVE FORCE AND LATERAL VIBRATION

和田 章*, 林 賢一**

Akira WADA and Kenichi HAYASHI

In general steel truss structures, the natural frequency of a member is sufficiently high in comparison to the lower level frequencies of the structure. Therefore, a member does not usually resonate with the structure.

The natural frequency of a member tends to be reduced by compressive force. In case that compression force comes close to Euler's buckling load or a part of member reaches plastic region, its frequency is particularly reduced to the range of structure's lower level frequencies.

For clarifying nonlinear dynamic behaviors of truss structures, this paper estimates the resonant behaviors of the members under a large axial force and lateral vibration.

Keywords : steel structure, truss member, nonlinear analysis, dynamic analysis, resonance, lateral vibration

鋼構造, トラス部材, 非線形数値解析, 動的解析, 共振, 座屈

1. 序 論

一般的な鉄骨トラス構造物では、両端をピン支持したトラス部材自身をもつ1次固有振動数は構造物全体の低次の振動数に比べて十分に高いため、部材の振動が構造物全体の振動と共振する可能性は少ない。

部材の固有振動数は部材が圧縮軸力を受けると小さくなる傾向があり、圧縮軸力がEuler座屈荷重に近づいたり、部材が部分的に塑性化すると、その振動数は特に小さくなり構造物全体の低次の振動数に近づき、部材の振動が構造物全体の振動に共振する可能性がでてくる。

また、外乱による構造物の振動は低次固有振動数が卓越するため、構造物の振動に伴う部材の軸力変動の振動数は構造物の卓越する低次固有振動数とほぼ同値となる。部材の軸力変動の振幅・振動数によっては部材は共振する。

強震時や強風時のトラス構造物の動的挙動を明確にかむためには、大きな圧縮軸力を受けるトラス部材が、振動する構造物中で共振現象を起こした場合の挙動を調べておく必要がある。

部材の共振条件は弾性体の安定問題に関する研究にお

いて述べられることが多い。例えば、周期的に変動する軸力の作用する弾性部材は変動軸力の平均軸力と円振動数によって、その最大軸力が弾性座屈荷重に達していかなくとも、不安定現象を起こすことが分かっている^{1)~3)}。

動的弾性座屈に関する研究ではMeier⁴⁾によって曲げモーメントの釣合いに曲率と慣性力を考慮した座屈式が提示されている。

弾塑性域での部材の共振に関しては、Kuranishi, Nakajima⁵⁾によって横方向からの正弦波加速度入力により共振する部材の動的挙動が解析されている。

部材の臨界現象に関する研究では、中村, 小坂ら⁶⁾によって正弦波加速度外乱下の1質点非線形履歴型骨組モデルの臨界挙動が外乱加速度振幅と外乱周期/構造物周期を2軸とする平面上で、対称定常振動, 非対称定常振動および発散挙動に分類されることを示し、石田, 中村ら⁷⁾によって風圧外乱を受ける鋼構造骨組の動的安定と塑性設計レベルとの関係について解析が行われ、上谷ら⁸⁾によって静的繰返し塑性変形を受ける圧縮材のたわみ形状の対称限界と定常状態限界に関する研究が行われている。

* 東京工業大学 教授・工学博士

** 東京工業大学 大学院生(現在, 新日本製鐵株式会社・工修)

Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

本研究では、部材の振動と構造物の振動との共振現象を解明するための基礎研究の1つとして、圧縮軸力を受け、両端を単純支持した一本の鋼構造部材の動的挙動を非線形数値解析によって追加し、部材の臨界現象と部材断面の耐力の関係、弾性部材の臨界条件の弾塑性部材に対する適応範囲、および部材の初期状態の臨界現象に与える影響を明らかにすることを目的とする。

ここで扱うような両端を単純支持された一本の部材に対する外力の変動成分としては材軸横方向への加速度と部材に作用する軸力の2つが考えられる。本研究ではこれらの組み合わせとして、次の3つの場合について部材の共振現象の動的数値解析を行い、その挙動を明らかにする。

- CASE.1 静的軸力を受ける部材に横方向の振動を与えた場合
CASE.2 部材に与える軸力を動的に変化させた場合
CASE.3 部材に横方向の振動と変動する軸力を同時に与えた場合

CASE.1において弾塑性部材の共振時挙動の基本原理解を説明し、CASE.2において弾性部材の臨界条件の弾塑性部材に対する適応範囲を検討し、CASE.3において構造物中の部材は横方向振動と軸力変動を同時に受けることからそのような状況を解析する。

2. 解析方法

2.1 概要

解析理論と仮定条件は基本的には文献9), 10), 11), 12)に述べたものと同じであるので、ここでは要点だけを示す。

- 1) 材料は鋼材を用いることとし、応力-ひずみ関係はbi-linear型とする。
- 2) 部材を線材として扱う。
- 3) 有限変形を考慮する。
- 4) 部材自身の質量による慣性力を考慮し、材料の塑性化を詳細に追跡できるようにするため、部材を長さ方向に細かく分割し、分割することによってできる節点に質点を設ける。
- 5) 質量マトリックスは集中質量マトリックスを用いる。
- 6) 動的数値解析には、運動方程式を短い時間間隔 Δt で逐次積分していく直接積分法の一つであるNewmark- β 法を用い、無条件安定ということから $\beta=1/4$ (定加速度法)を用いる。
- 7) 文献7)で示した方法によれば、自由度は1節点について、並進自由度3成分、各軸周りの回転自由度3成分と断面の反りに関する自由度1成分の7成分まで扱えるが、本研究では2次元問題として解析を行うので1節点当たりの自由度は、並進自由度2成分、回転自由度1

成分とし、他の自由度は拘束して解析を進める。また、部材を分割してできる内部節点において質点を設けていない自由度はサブストラクチャー法により消去する方法を用いる。

- 8) 各節点における並進自由度の項に外力および慣性力が作用し、回転自由度の項には外力および慣性力は作用しないものとする。この仮定により回転自由度の項は静的縮小法により消去し、運動方程式に含めない。
- 9) 共振時の理想状況を設定するため、減衰の影響は考慮しない。
- 10) 積分間隔 Δt が小さいほど、数値解の精度の向上につながり、構造物の終局状態を解析するのに有利であること、さらに高次振動モードの影響により解が不安定になることを防止できることが経験的に分かっている。これを考慮して、本研究では Δt を最高次周期の1/10以下とする。

2.2 収束計算

各積分ステップにおける外力と、慣性力・内部節点力の和との差で計算される不釣合力を収束計算によって設定した条件まで減少させる。

運動方程式にNewmark- β 法を用いて時刻 $t+\Delta t$ における加速度を解として求める形にすると、

$$(M + \beta \Delta t^2 K_t) a_{t+\Delta t} = f_{ex\ t+\Delta t} - K_t \left[\Delta t v_t + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \Delta t a_t \right] - f_{in\ t} \dots \dots (2.1)$$

となるが、この式にNewton-Raphson法を導入して収束計算を行うにあたって方程式を次のように変更する。

解として時刻 $t+\Delta t$ における加速度を求めるのであれば、各積分ステップでの第1段において解く方程式は

$$(M + \beta \Delta t^2 K_t) a_{t+\Delta t}^{(1)} = f_{ex\ t+\Delta t} - K_t \left[\Delta t v_t + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \Delta t a_t \right] - f_{in\ t} \dots \dots (2.2)$$

であり、第 n 段以降において解く方程式は

$$(M + \beta \Delta t^2 K_t^{(n)}) a_{t+\Delta t}^{(n+1)} = f_{ex\ t+\Delta t} - K_t^{(n)} \left\{ \beta \Delta t^2 a_{t+\Delta t}^{(n)} \right\} - f_{in\ t+\Delta t}^{(n)} \dots \dots (2.3)$$

である。

解として時刻 $t+\Delta t$ における増分加速度を求めるのであれば、第1段において解く方程式は

$$(M + \beta \Delta t^2 K_t) a_{t+\Delta t}^{(1)} = f_{ex\ t+\Delta t} - M a_t - K_t \left\{ \Delta t v_t + \frac{\Delta t^2}{2} a_t \right\} - f_{in\ t} \dots \dots (2.4)$$

であり、第 n 段以降において解く方程式は

$$(M + \beta \Delta t^2 K_{t+\Delta t}^{(n)}) a_{t+\Delta t}^{(n+1)} = f_{ex\ t+\Delta t} - M a_{t+\Delta t}^{(n)} - f_{in\ t+\Delta t}^{(n)} \dots \dots (2.5)$$

である。

どちらも収束条件は

$$r = f_{ex\ t+\Delta t} - M a_{t+\Delta t}^{(n+1)} - f_{in\ t+\Delta t}^{(n+1)} \dots \dots (2.6)$$

によって不釣合力 r を求め、各自由度 i ごとに

$$\frac{r_i^2}{f_0^2} \leq 10^{-6} \dots \dots \dots (2.7)$$

を満たすまで反復計算する。定数 f_0 は外力 f_{ex} と同程度の大きさの数値である。

本研究では加速度を求める前者の方法を用いる。この方法を用いる理由は、増分加速度を求める方法は数値解を誤差レベルで扱うことになり、数値解が不安定になりやすいからである。式 (2.1)~(2.6) で用いた記号の意味を以下に示す。

M : 質量マトリックス, K : 剛性マトリックス,

f_{ex} : 外力ベクトル, f_{in} : 内力ベクトル,

d : 変位ベクトル, v : 速度ベクトル,

a : 加速度ベクトル, Δa : 増分加速度ベクトル

右下の添字は時刻, 右上のかっこ内の添字は積分ステップ中の収束計算回数を表す。

2.3 解析モデル

材料定数を表-2.1 に, 応力-ひずみ関係を図-2.1 に, 解析する部材寸法・断面性能等を表-2.2 に, 部材形状・断面分割を図-2.2 に示す。

解析結果は部材の軸方向分割によって解析結果は異なり, 分割はある程度細かい方が良いが, 多数の計算を行うためには許容できる範囲内で分割数を減らしたい。ここでは図-2.3 に次の4つの分割方法による解析結果から本論文で用いた分割数の妥当性を示す。

1. 部材を20分割し計2個の質点を設ける。
2. 部材を12分割し計6個の質点を設ける。
3. 部材を20分割し計10個の質点を設ける。
4. 部材を40分割し計20個の質点を設ける。

表-2.1 材料の諸定数

弾性剛性	E_e (Pa)	2.06×10^{11}
塑性剛性	E_p (Pa)	5.15×10^8
降伏応力	σ_y (Pa)	2.35×10^8
降伏歪	ϵ_y	1.14×10^{-3}
密度	ρ (kg/m ³)	7.85×10^3

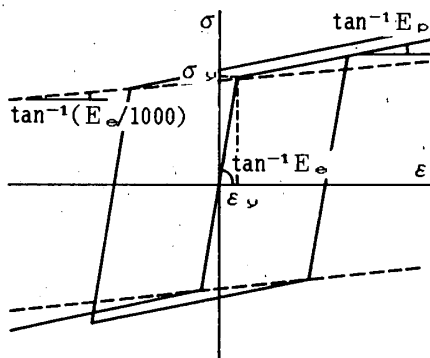


図-2.1 材料の応力-ひずみ関係

表-2.2 部材・断面寸法, 断面性能等一覧

細長比	λ	60	120
部材長	l (m)	3.0	
部材幅	b (m)	1.28×10^{-1}	7.22×10^{-2}
部材板厚	t (m)	6.00×10^{-3}	1.22×10^{-2}
断面積	A (m ²)	2.94×10^{-3}	
断面2次モーメント	I (m ⁴)	7.34×10^{-6}	1.83×10^{-6}
断面2次半径	i (m)	5.00×10^{-2}	2.50×10^{-2}
Euler座屈荷重	P_E (N)	1.66×10^6	4.14×10^5
降伏荷重	P_y (N)	6.91×10^5	
単位長さ質量	ρA (kg/m)	2.30×10^1	
全質量	ρAl (kg)	6.91×10^1	
1次固有円振動数(軸力0)	ω_0 (rad/s)	2.81×10^2	1.40×10^2

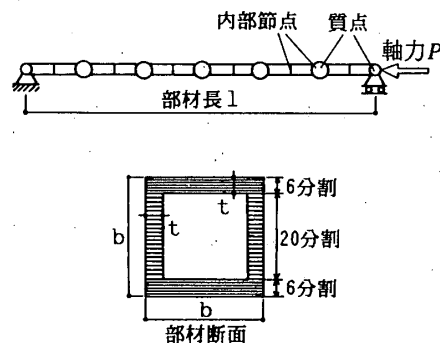


図-2.2 部材形状・断面分割

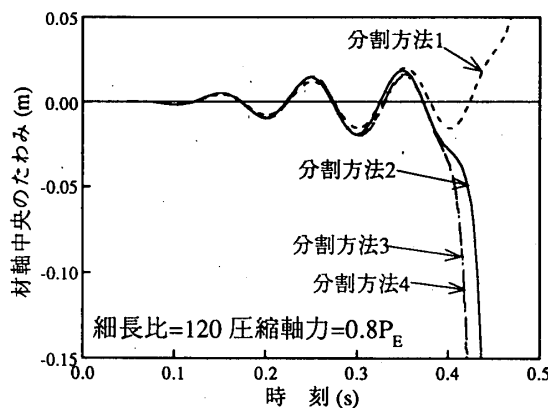


図-2.3 材軸中央のたわみの時刻歴

ここに示す結果は後に説明する CASE.1 の細長比 120 の部材について, 入力加速度の周期を部材の 1 次固有周期に合わせた場合の部材中央のたわみの時刻歴である。積分間隔 Δt は各分割方法での最高次周期の 1/10 とした。これによると質点数が少ないほど大変形に至る時刻が遅れ, 解析可能な変形量も小さい。材料の塑性化および部材の有限変形の評価等をできる限り正確に追跡し解析精度を保つためには軸方向分割を細かくし, 節点

数に対する質点数は多い方が良いが、最高次周期が非常に短くなり積分間隔 Δt を非常に小さな値にしなくてはならない。よって図-2.3 から分割方法 2~4 の軌跡がほとんど同じであることから本研究では部材を軸方向に 12 分割し 2 要素間隔で計 6 個の質点を設けることとする。

部材の細長比としては、60 と 120 の 2 種類を対象とし、Euler 座屈荷重 P_E が降伏荷重 P_y を超え塑性座屈する性質を持つ部材とを扱い、その解析結果を比較する。このとき、部材と、 P_E が P_y 以下で弾性座屈する性質を持つ部材長、断面積を共通にして断面形状を変えることによって細長比を変えることとする。この結果、2 種類の部材は全質量、単位長さ質量が同一となり、慣性力の影響を検討するのに分かりやすくなる。

3. 部材の共振時の挙動の解析

本研究では、序論で述べた CASE. 1~3 の共振状況を設定し動的数値解析を行う。各 CASE について詳細を説明する。

解析は式(2.7)を満たさなくなった時点で終了とする。
[CASE.1 静的軸力を受ける部材に横方向の振動を与えた場合]

文献1), 2) によると軸力 P の作用する弾性部材の 1 次固有円振動数 ω_1 は

$$\omega_1 = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{1}{\rho A} \left(\frac{\pi^2 EI}{l^2} - P \right)} \dots\dots\dots (3.1)$$

ρ : 密度, A : 断面積, l : 部材長,
 E : ヤング率, I : 断面 2 次モーメント
となる。

本研究では部材に静的圧縮軸力 P_0 を作用させ、その圧縮軸力の作用するときの部材の ω_1 と同値の円振動数 Ω_L の正弦波形の加速度を部材の横方向に入力し、部材の共振状況を作り出す。

静的に導入する初期圧縮軸力 P_0 は、細長比 60 の部材は降伏荷重 P_y の 0.6 倍 (Euler 座屈荷重 P_E の 0.25 倍) であり、細長比 120 の部材は Euler 座屈荷重 P_E の 0.6 倍 (降伏荷重 P_y の 0.36 倍) である。

式(3.2)に示す加速度を部材の横方向に支点入力する。

$$a(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left\{ 1 - \cos \left(\frac{\Omega_L}{4} t \right) \right\} g \sin(\Omega_L t), & (t < \frac{4\pi}{\Omega_L}) \\ g \sin(\Omega_L t), & (t \geq \frac{4\pi}{\Omega_L}) \end{cases} \dots\dots\dots (3.2)$$

g : 重力加速度 (=9.81 m/s²)

以下に解析結果を示す。図-3.1 の各細長比の部材の材軸中央のたわみの時刻歴によると、たわみは 0 の軸を

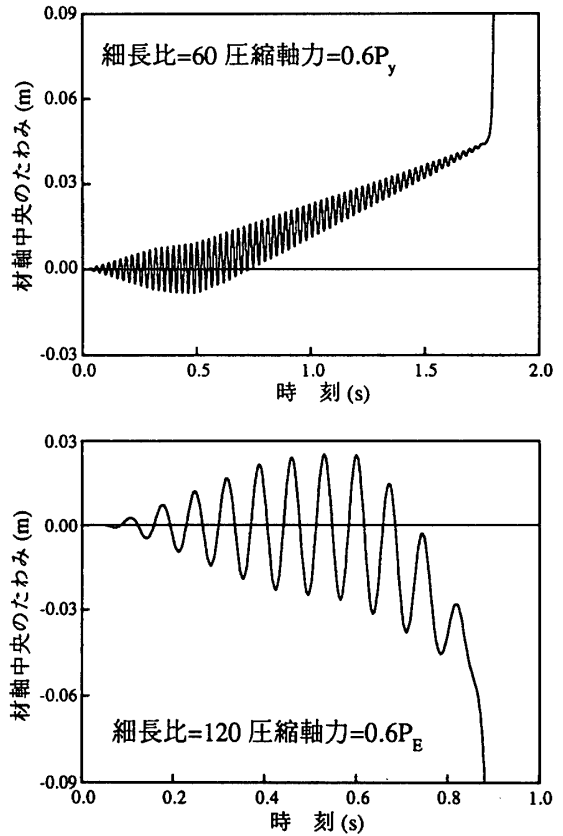


図-3.1 材軸中央のたわみの時刻歴 (CASE. 1)

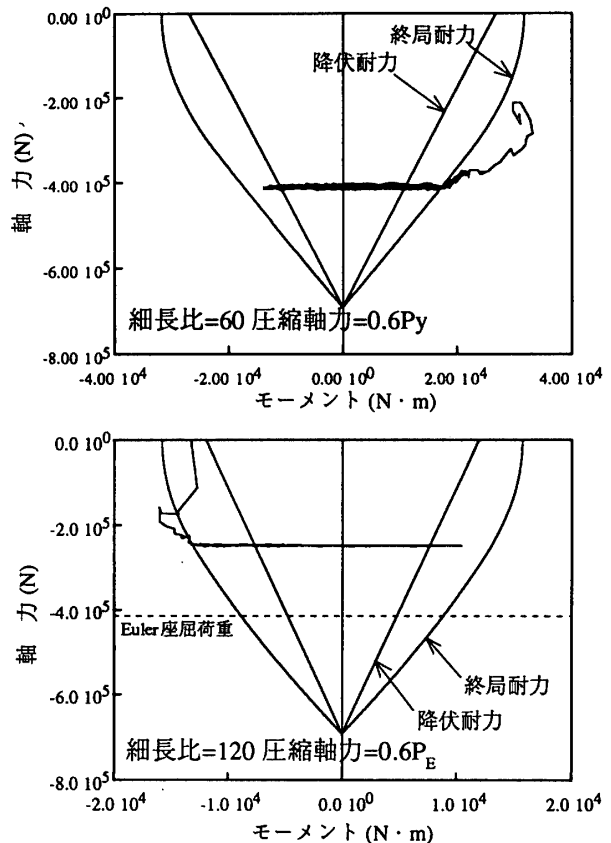


図-3.2 材軸中央の断面の N-M 履歴曲線 (CASE. 1)

中心に振動し始め、振幅が漸増してゆく弾性共振を示すが、たわみ振動の振幅は減衰し始め、それとともにたわみが一方に増加し、たわみ振動が完全に減衰した直後に急激にたわみが増加している。

このことを部材の断面の $N-M$ 履歴曲線によって説明する。図-3.2 に各細長比の部材の材軸中央附近の断面の $N-M$ 履歴曲線を示す。図中に断面の端部が降伏応力に達したときの $N-M$ 相関曲線を降伏耐力として、ひずみ硬化を無視して全断面が一定の降伏応力を受け持つとして求めた $N-M$ 相関曲線を終局耐力として示す。軸力が一定の状態 で曲げモーメントが正負交互に増加し、曲げモーメントが降伏耐力に達すると曲げモーメントの増加が一方に偏り始めることから部材のたわみの振動の中心軸が 0 から増加していることが分かる。さらに曲げモーメントが増加し終局耐力に達すると、曲げモーメントは応力-ひずみ関係の 2 次勾配の影響で増加するものの軸力は低下してゆき部材が大変形に至っているのが分かる。軸力が低下するのは軸方向変形が急激に生じることによる部材の質量による軸方向慣性力が大きくなり外力に直接抵抗するためである。

以上が弾塑性部材の共振時挙動の原理であり、以下の CASE.2, CASE.3 においても基本的には同じである。[CASE.2 部材に与える軸力を動的に変化させた場合] 境界条件が両端ピンの部材の Euler 座屈荷重 P_E は、

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \dots\dots\dots (3.3)$$

と表せ、文献 2) によると軸力の作用しない弾性部材の 1 次固有円振動数 ω_0 は、

$$\omega_0 = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{1}{\rho A} \frac{\pi^2 EI}{l^2}} \dots\dots\dots (3.4)$$

と表せる。文献 1), 2) によると弾性部材に振幅 S , 円振動数 Ω_P で変化する軸力 $P = P_0 + S \cos(\Omega_P t)$ が作用するとき a, b を

$$a = \frac{\omega_0^2}{\Omega_P^2} \left(1 - \frac{P_0}{P_E}\right), \quad b = -\frac{\omega_0^2}{\Omega_P^2} \frac{S}{P_E} \dots\dots\dots (3.5)$$

とすると図-3.7 に示すように a, b を 2 軸とする平面上で暗色領域を満たすとき部材は定常振動を示し、それ以外の領域にあるときは発散挙動を示すことが分かっている。また式 (3.5) から

$$b = -\frac{S}{P_E - P_0} a \dots\dots\dots (3.6)$$

となることから P_0, S が定めればこの関係を一直線として図中に示すことができる。

本研究では細長比 60 と 120 の部材について、いくつかの状況について動的解析を行う。圧縮軸力は次式の関係を用いて変動させる。

$$P(t) = \begin{cases} P_0 + \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\Omega_P}{4} t\right) \right] S \sin(\Omega_P t), & \left(t < \frac{4\pi}{\Omega_P} \right) \\ P_0 + S \sin(\Omega_P t), & \left(t \geq \frac{4\pi}{\Omega_P} \right) \end{cases} \dots\dots\dots (3.7)$$

なお、部材の初期たわみは部材が水平に置かれているものと考え重力により部材が変形する量とし、動的解析を行う際にも常に重力は作用し続けているとする。この時の初期たわみは細長比 60 の部材は部材長の 1/19 000、細長比 120 の部材は部材長の 1/4 800 である。

軸力の変動による部材の発散挙動を CASE.1 と同様に材軸中央のたわみと材軸中央断面の $N-M$ 履歴曲線によって示す。細長比 120 の部材に対して静的圧縮軸力 P_0 を Euler 座屈荷重 P_E の 0.6 倍、振幅 S を P_E の 0.2 倍、 $a=1$ として解析を行った結果を図-3.3, 図-3.4 に示す。CASE.1 での説明とほぼ同様のことがいえるが、図-3.4 では $N-M$ 履歴曲線が降伏耐力に達すると部材が非対称振動をすることが明瞭となっている。

$a-b$ 平面上に各部材について行った解析条件とその結果を示す。

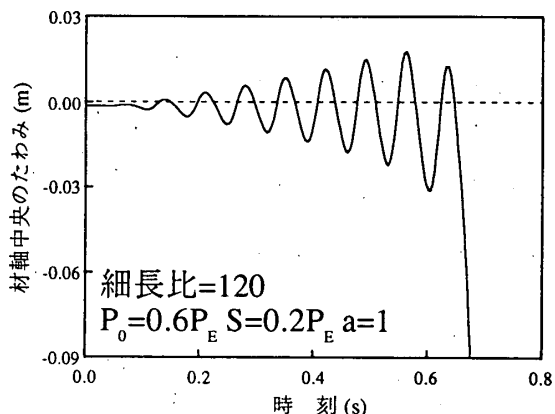


図-3.3 材軸中央のたわみの時刻歴 (CASE. 2)

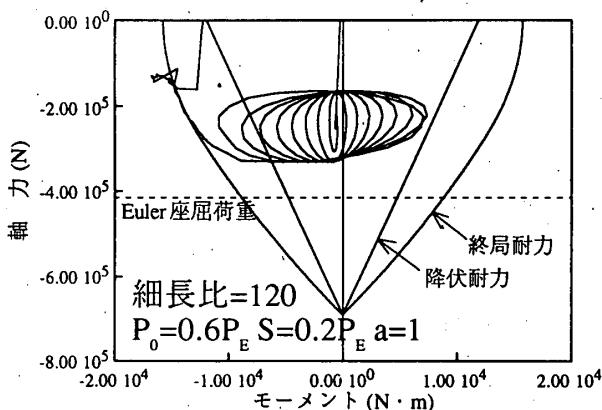


図-3.4 材軸中央の断面の $N-M$ 履歴曲線 (CASE. 2)

図-3.5 に細長比 60 の部材に対して静的圧縮軸力 P_0 を 0, 振幅 S を降伏荷重 P_y の 0.9 倍として解析を行った結果を, 図-3.6 に細長比 60 の部材に対して静的圧縮軸力 P_0 を Euler 座屈荷重 P_E の 0.8 倍, 振幅 S を P_y の 0.1 倍として解析を行った結果を示す。それぞれ $a=3, 4, 5$ 上の点における条件により Ω_p を定めて解析する。解析を行ったすべての点は弾性部材であれば定常振動を示す領域にあるが, 解析結果では弾塑性部材でも定常振動を示した。細長比 60 の部材は圧縮降伏荷重が Euler 座屈荷重より低く図に示す $P_0 + S = P_y$ の線より上部の領域には解が存在せず, 解析での $P_0 + S = 0.9 P_y$ となるような高圧縮軸力状態で定常状態を示すことは $a=1/4, 1$ 辺りの発散挙動領域付近の定常振動領域を除いて弾塑性部材の臨界条件は弾性部材とほぼ同じであると考えられる。

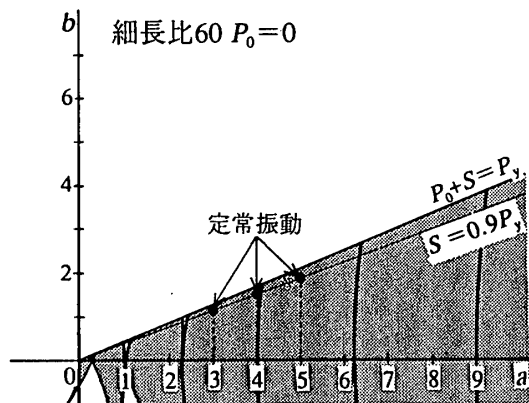


図-3.5 弾性臨界条件と弾塑性部材の解析結果 (細長比 60, $P_0=0$)

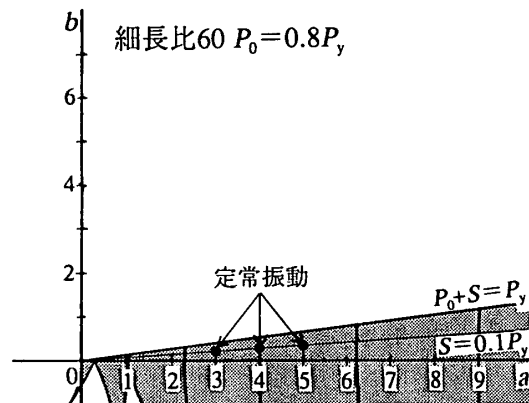


図-3.6 弾性臨界条件と弾塑性部材の解析結果 (細長比 60, $P_0=0.8 P_y$)

図-3.7 に細長比 120 の部材に対して静的圧縮軸力 P_0 を Euler 座屈荷重 P_E の 0.6 倍, 振幅 S を P_E の 0.2 ~ 0.5 倍として解析を行った結果を, 図-3.8 に細長比 120 の部材に対して静的圧縮軸力 P_0 を Euler 座屈荷重 P_E の 0.8 倍, 振幅 S を Euler 座屈荷重 P_E の 0.05 ~ 0.2 倍として解析を行った結果を示す。それぞれ $a=3, 4, 5$ 上の点における条件により Ω_p を定めて解析する。弾性部材で発散挙動を示す点では弾塑性部材も発散挙動を示す。 $a=4, 5$ 上の点では弾性部材では定常振動を示す点でも弾塑性部材になると発散挙動を示す点が存在する。 $a=3, 5$ 上では $P_0=0.6 P_E, P_0=0.8 P_E$ であっても臨界線は近いところにあると思われるが, $a=4$ 上では $P_0=0.8 P_E$ では $P_0=0.6 P_E$ より臨界線が低くなっていることが分かる。

[CASE. 3 部材に横方向の振動と変動する軸力を同時に与えた場合]
 構造物全体が振動しているとき, 構造物中の部材は横方向に振動させられると同時に, 作用する軸力も変動する。部材に作用する横方向振動の振動数と変動軸力の振動数は構造物の振動が卓越する低次固有振動数と考えられる。
 本研究では CASE. 1 の式(3.2)と CASE. 2 の式(3.7)を $\Omega_L = \Omega_p$ として同時に部材に作用させ, 横方向振動と軸力変動を同時に受ける部材の状態を動的解析する。
 CASE. 2 の結果から軸力変動だけでは部材が定常振

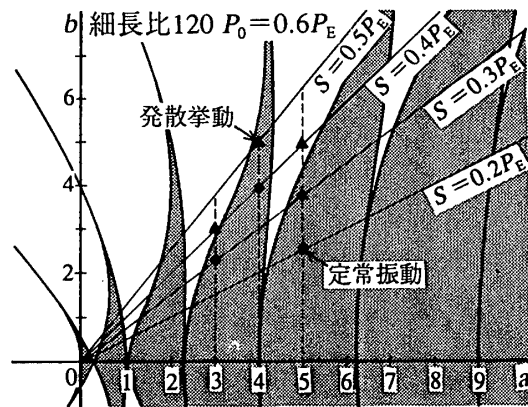


図-3.7 弾性臨界条件と弾塑性部材の解析結果 (細長比 120, $P_0=0.6 P_E$)

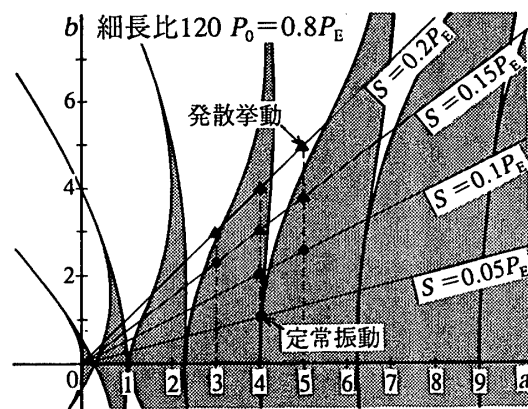


図-3.8 弾性臨界条件と弾塑性部材の解析結果 (細長比 120, $P_0=0.8 P_E$)

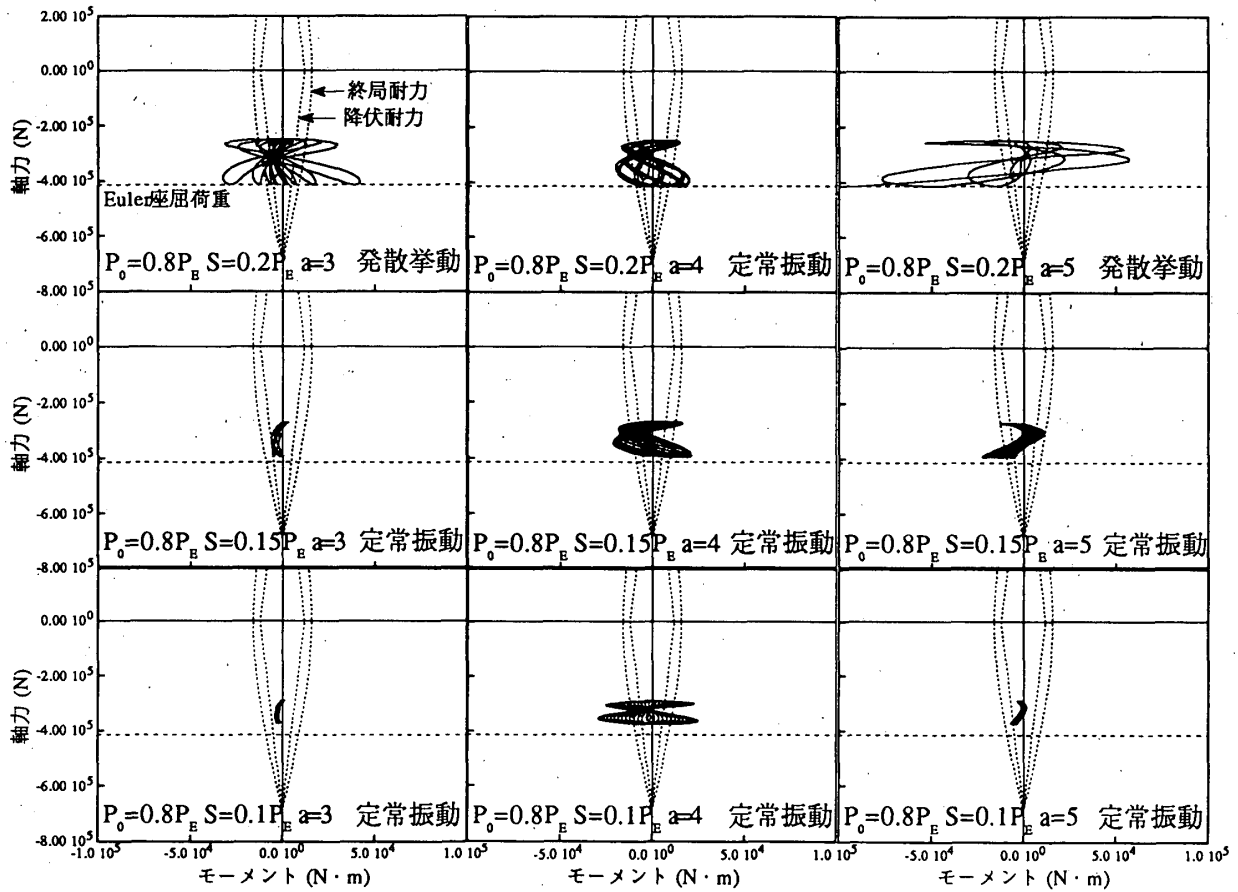


図-4.1 材軸中央の断面の $N-M$ 履歴曲線 (弾性・初期たわみ 1/3 000)

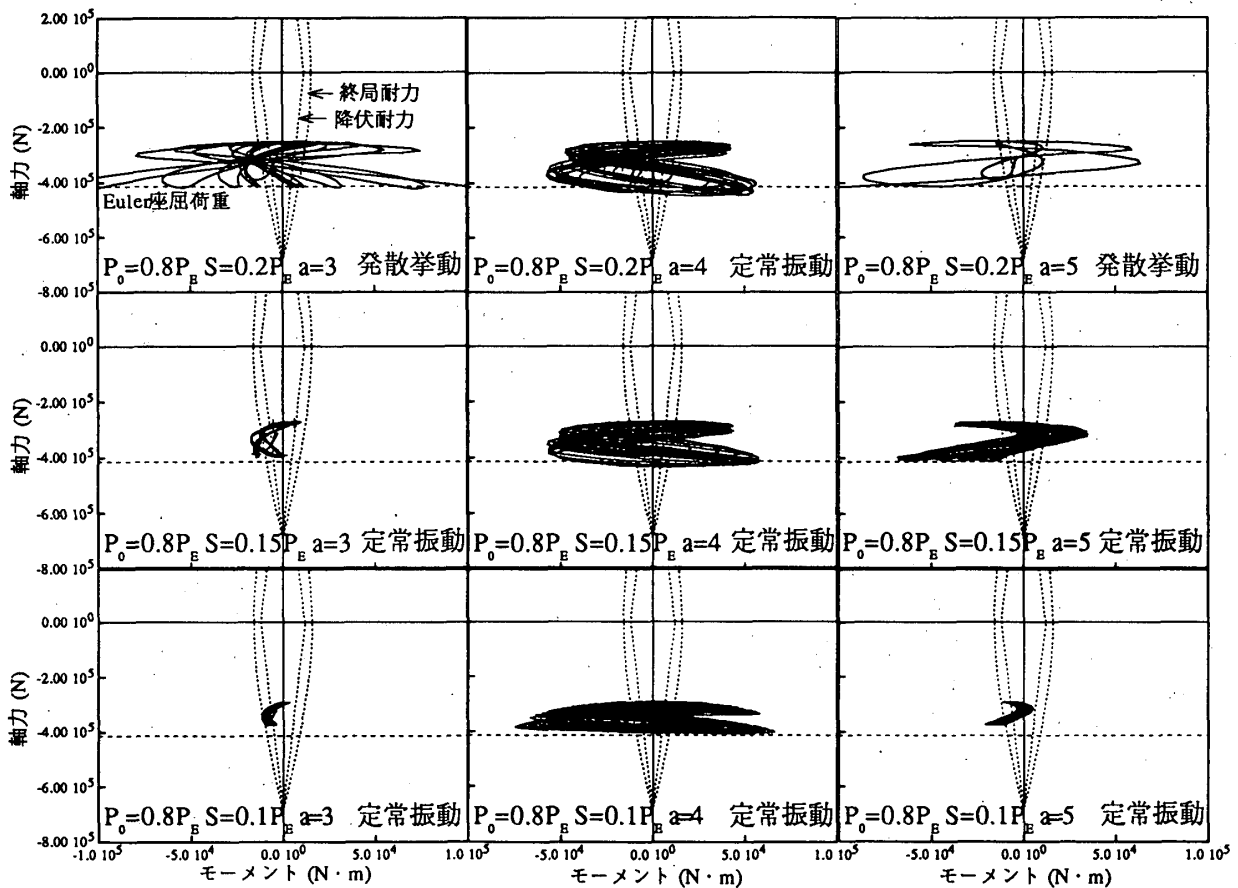


図-4.2 材軸中央の断面の $N-M$ 履歴曲線 (弾性・初期たわみ 1/1 000)

動を示す解析条件を選んで解析する。

細長比 60 の部材に対しては、図—3.6 の CASE.2 の解析条件と同じである静的圧縮軸力 P_0 を降伏荷重 P_y の 0.8 倍、振幅 S を降伏荷重 P_y の 0.1 倍とした $a=3, 4, 5$ 上の 3 点において解析を行ったが、図—3.6 の CASE.2 の結果と同様にいずれも定常振動を示した。

細長比 120 の部材に対しては、図—3.8 の CASE.2 の解析結果では定常振動を示した静的圧縮軸力 P_0 を Euler 座屈荷重 P_E の 0.8 倍、振幅 S を P_E の 0.05 ~ 0.15 倍とした $a=3, 4, 5$ 上の 3 点において解析を行ったが、いずれも発散挙動を示すようになった。

4. 考察

弾塑性部材の臨界現象が部材断面の耐力と関係があることから部材の初期たわみが部材の臨界現象に大きな影響を与えると考えられる。ここでは CASE.2 と同様の方法により弾性部材の初期たわみが軸力変動下の挙動に与える影響を検討する。

細長比 120 の部材に対して静的圧縮軸力 P_0 を Euler 座屈荷重 P_E の 0.8 倍、振幅 S を P_E の 0.1, 0.15, 0.2 倍、 $a=3, 4, 5$ 上の 9 つの点において解析を行う。初期たわみは部材を半正弦波形として与え、それぞれの場合に対し材軸中央のたわみを部材長の 1/3 000, 1/1 000 とし解析を行った。

各解析結果から材軸中央付近の断面の $N-M$ 履歴曲線を示す。図—4.1 に材軸中央の初期たわみが 1/3 000 の $N-M$ 履歴曲線を、図—4.2 に材軸中央の初期たわみが 1/1 000 の $N-M$ 履歴曲線を示す。初期たわみが大きい部材の方が小さい部材に比べ最大モーメントが大きい、この程度の初期たわみでは臨界条件は理論と一致している。発散挙動を示す点では定常振動を示す点に比べモーメントの増加が極端に大きくなっている。 $a=4$ 上では $a=3, 5$ に比べ S による最大モーメントの差がほとんど無い。同じ図に弾塑性部材断面の降伏耐力相関曲線、終局耐力相関曲線を示す。定常振動を示す弾性部材の履歴曲線が降伏耐力相関曲線または終局耐力相関曲線を越えているならば、その部材を弾塑性とした場合、同じ状況化で発散挙動を示すと考えられる。この 9 点では弾塑性部材において部材中央の初期たわみを 1/3 000 とした場合、定常振動を示す点は $a=3, S=0.15 P_E$ と $a=3, S=0.1 P_E$ の 2 点だけで他は発散挙動を示し、部材中央の初期たわみを 1/1 000 とした場合、すべての点において発散挙動を示していた。

5. 結論

本研究では、細長比が 60 と 120 の両端を単純支持された部材について、3 CASE の状況を設定し、部材の弾塑性領域の動的挙動を非線形数値解析によって追跡し、

以下の結論が得られた。

- 1) 非減衰系で圧縮軸力を受ける部材が共振する場合、正負繰返しの漸増変形によって部材が降伏耐力に達すると非対称振動をし、終局耐力に達するとその瞬間に大変形が生じ、部材耐力は低下する。
- 2) 弾性部材が軸力変動によって定常振動を示す条件下において弾塑性部材は発散挙動を示すことがあり、弾塑性部材の定常振動と発散挙動の臨界条件は部材の初期たわみに影響される。
- 3) 部材に横方向振動と軸力変動が同時に作用する場合、細長比 60 の部材の発散振動領域に大きな変化は無いが、細長比 120 の部材の発散振動領域は拡大する。

参考文献

- 1) Klotter, K. : Stabilisierung und Labilisierung durch Schwingungen, Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, Nr. 5, S. 210~225, 1941. 9-10
- 2) Timoshenko, Stephen P. and Gere, James M. : The Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1936
- 3) Strutt, M. J. O. : Beugung einer ebenen Welle an einem Spalt von endlicher Breite, Zeitschrift für Physik, Bd. 69, S. 597~617, 1931. 4
- 4) Meier, J. H. : On the Dynamics of Elastic Buckling, Journal of the Aeronautical Sciences, pp. 433 ~ 440, 1945
- 5) Kuranishi, Shigeru and Nakajima, Akinori : Dynamic Strength Characteristics of Axially Loaded Columns Subjected to Periodic Lateral Acceleration, Proc. of JSCE, No. 341, pp. 41~49, 1984. 1
- 6) Morisako, Kiyotaka, Ishida, Shuzo, Nakamura, Tsuneyoshi and Ishizaki, Hatsuo : Dynamic Collapse of Frames under Wind Disturbances, ASCE, Vol. 107, No. ST12, pp. 2365~2380, 1981. 12
- 7) 中村恒善, 小坂郁夫, 来田義弘 : 正弦波加速度外乱下の 1 質点非線形履歴型骨組モデルの定常振動と発散挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), pp. 1027 ~ 1028, 1983. 9
- 8) Uetani, K. and Nakamura, Tsuneyoshi : Symmetry Limit Theory for Cantilever Beam-Columns, J. Mech. Solids, Vol. 31, No. 6, pp. 449~484, 1983
- 9) 藤本盛久, 和田 章, 白方和彦, 小杉 立 : 筋違付鉄骨ラーメンの弾塑性解析に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 209, pp. 41~51, 1973. 7
- 10) 藤本盛久, 和田 章, 岩田 衛, 中谷文俊 : 鋼構造骨組の三次元非線形解析, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 227, pp. 75~90, 1975. 1
- 11) 和田 章, 久保田英之 : 実規模鋼構造骨組の 3 次元非線形解析へのスーパーコンピュータの応用, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 394, pp. 94~104, 1988. 12
- 12) 和田 章, 久保田英之 : 崩壊問題の動的解析法, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 403, pp. 97~103, 1989. 9

(1991 年 9 月 10 日原稿受理, 1992 年 6 月 26 日採用決定)