

振動制御のための座屈拘束ブレースに関する分岐経路追跡

Bifurcation Path Tracing of Buckling-restrained Braces for Vibration Control

栗山 好夫, 吉田 競人

KURIYAMA Yoshio, YOSHIDA Keito

1. はじめに

座屈拘束ブレースは構造物の振動制御を目的としたもので従来アンボンドブレースと呼ばれ、日本では 1980 年代から現在まで多くの研究がすすめられている。その研究分野の広がりにより 1998 年に米国に紹介され、2003 年連邦政府の緊急管理庁 (FEMA) の推奨規準および鋼構造協会 (AISC) の耐震設計指針に規準化された⁽¹⁾。

振動制御技術を分類すると、耐振 (剛構造と柔構造)、免振 (アイソレータ+ダンパ)、制振 (パッシブ制御とアクティブ制御) の 3 種類になる⁽²⁾。本研究の座屈拘束ブレースは、このうちのパッシブ制御に属し、制御機構としては弾塑性ダンパの履歴減衰型 (変位型) になり、図 1 の左図と図 2 に示す構造によりエネルギー吸収と安定した履歴形状特性を有する特徴がある。

図 1 の右図に示す従来の鉄骨ブレースは水平力に対して有効かつ効率的に抵抗する制振構造要素であるが、一般的に鉄骨ブレースの細長比は大きく圧縮力が作用した時の座屈は避けられない。また、コンクリートなどによる座屈拘束材を使用した場合は、軸剛性が高まり周

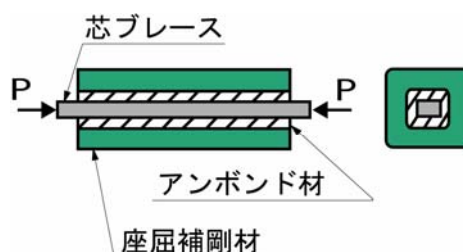


図 2 座屈拘束ブレースの構造

辺の柱に軸応力が集中し設計が困難になる。これらの欠点を解決するために考案されたものが座屈拘束ブレースである。すなわち座屈拘束のために芯ブレース外側に剛性の高い部材を配置し、座屈を拘束すると共に、これにより軸剛性をもたらしことがないように芯ブレースとの付着を排除した制振部材である。

この座屈拘束ブレースは、軸方向力を伝達する芯ブレースと座屈を拘束する補剛材から構成され、これら部材間のアンボンド材により付着力を排除している。座屈が補剛材により拘束されているため、圧縮と引張の繰り返し力を生じる地震などに対して有効な制振部材となり、図 3 に示すように多くの建物に使用されている。

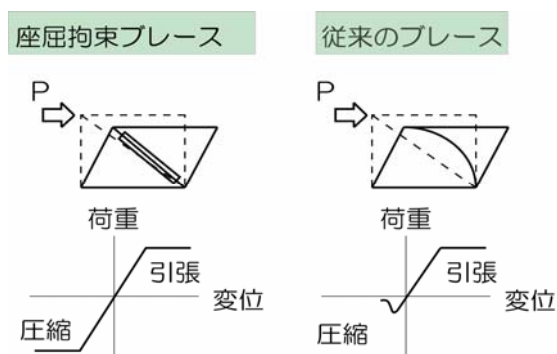


図 1 ブレースの荷重-変位特性

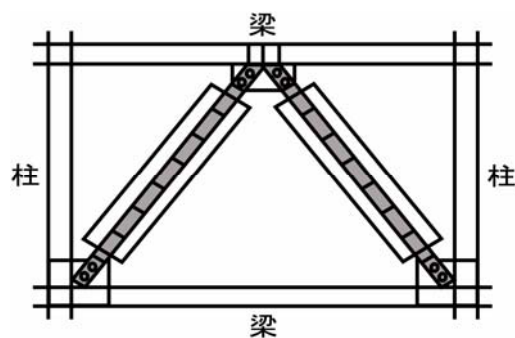


図 3 座屈拘束ブレースの適用例

より積極的な制振要素としての利用を考えるためには、今後補剛材と芯ブレースの間隙や摩擦力などのパラメータを実験と解析を含めて考慮するとともに精緻な挙動を得るためには芯ブレースに生じる波状の変形を再現することおよびこのときの荷重—変位線図を求める解析が必要である。

著者らは座屈拘束ブレースを芯ブレースと補剛材の接触問題として解析⁽³⁾を行い、波状の変形を考慮するために微小な形状不整を用いた突起付きモデル等を検討して分岐した変形モードを得た。しかし、これらのモデルを用いて、実験等で得られている荷重—変位履歴特性を再現することを試みたが、用いてきた分岐経路追跡法が荷重制御法であったため、荷重の極大点近傍の解析値までしか得られなかった⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

そのため本紀要の前報⁽⁶⁾では、座屈拘束ブレースに関する分岐経路追跡法（荷重制御、変位制御および弧長制御法）について、解析の原理を理解するためこれらを詳細に検討した。これらの中、変位制御と弧長制御法を用いて、全長が4680mmで隙間等の条件を一定にしたこれまでのモデルで経路追跡を試みたところ、収束性の問題等で想定している解が容易に得られなかった。

この対応の困難さを体験して、これらの方法により丹念に解析条件を探ることが時間的に経済的でないと判断したため、とにかく座屈後のある平衡状態を求めるというのであれば動的解析を利用することも一つの手段になることを検討した。

そこで、経路追跡法の手段として陰解法による時刻歴応答解析を適用するために、はじめに補剛材のない芯ブレースのみのモデルで実験と解析を行い、合わせて静的解析手法の検証を行った。この実験と静的解析結果はよく一致したが、動的な解法ではハードウェアの問題であるメモリ不足の問題も生じたため得られた解が振動する問題が残った⁽⁶⁾。

本報告では、このメモリ不足の問題をリスタ

ート機能を適用した繰り返し処理で解決した後、当初の突起のない通常のモデルに戻り、補剛材との隙間等の条件をパラメータにして、動的な解法である時刻歴応答解析を実施したところ、良好な結果が得られた⁽⁷⁾のでこれを報告する。また、この時刻歴応答解析と比較するために、この中の一定の条件のもとで得られた変位制御法による解と比較して、このときの差異を検討した。

ここでは前報⁽⁶⁾後の経過報告のため、一部内容が前報と重複するが、そこに新たな結果が含まれるため、次の実験結果との比較検証の項から報告する。

2. 分岐経路追跡解析とモデル実験との比較

分岐経路追跡解析の検証のために、一般的な鉄筋ブレース（直径9mm×長さ880mmの鉄筋）を用いて図4に示す加力装置により図5に示す実験と静的解法による荷重—変位線図を得た。塑性オプションの設定は単純な2直線近似による移動硬化則を用いたが、図5に示されるように、解析値は実物試験結果をよく反映している。なお、荷重制御法では前報⁽⁶⁾の理由から座屈後は追跡できなかったが、その他の経路では他の制御法と同一の値が得られた。

また、動的解法を適用したときは座屈後の解が振動していた⁽⁶⁾が、比例減衰係数とサブステップ数を調整して図5に示す解析結果と同じ経路になる条件を確認した。

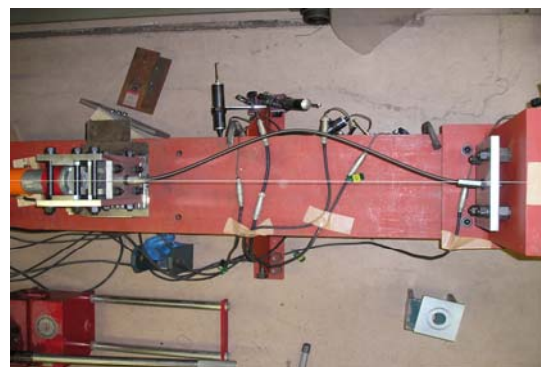


図 4(a) L=880 鉄筋ブレースの圧縮実験
($P=-2.06\text{KN}$, $\delta=-36.0\text{mm}$, $\epsilon=-4.0\%$)

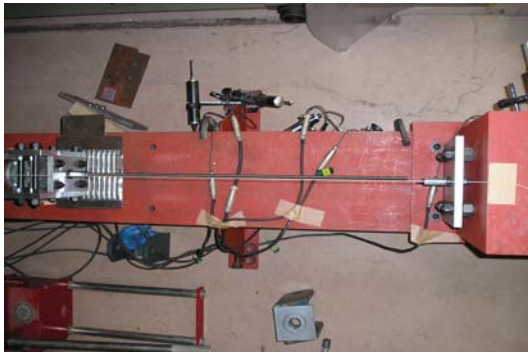


図 4 (b) 引張実験（右端が切断）

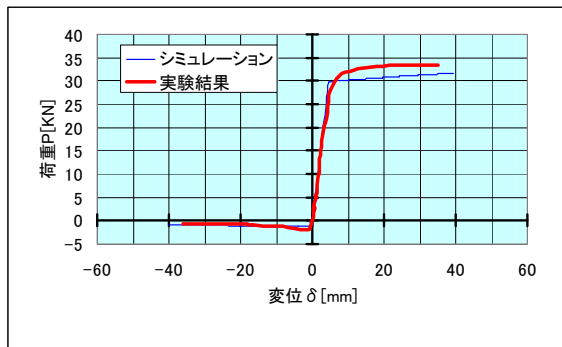


図 5 L=880 鉄筋ブレースの圧縮・引張実験とシミュレーション（動的・静的解）結果の比較

3. 解析概要

3. 1 解析プログラム

解析では汎用コード ANSYS Rel. 9.0 を用いた。また、座屈拘束ブレース問題では幾何学的非線形（大変形問題）、材料非線形（弾塑性問題）、状態変化（接触問題）が含まれる。これらの非線形問題のために、ANSYS では反復処理として Newton-Raphson 法が用いられている。

3. 2 解析モデル

モデル形状は、前報⁽⁶⁾と同じ芯ブレース形状を解析用に用いた。このモデルの境界条件の詳細を図 6 に示す。図において、中央に位置する芯ブレースを両端固定端として上部から鉛直方向の集中荷重 P を加えるため、 $45 \times 90 \times 45$ の形状を水平方向の自由度を拘束して上部に追加した。また、両側の補剛材と芯ブレースの間隙を e として、この影響を検討した。

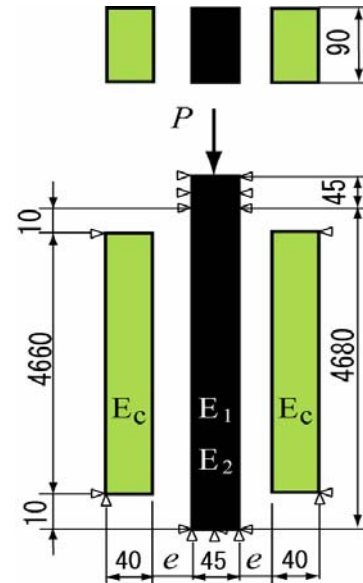


図 6 解析モデル

なお、芯ブレースおよび補剛材とも並進 2 自由度を有する中間節点のある二次元ソリッドを用い、芯ブレースは横幅 45 を 5 層に分割した 9×9 の要素サイズで、補剛材は相対的に剛性が大きいので約 40×40 で分割した。

また、芯ブレースは初期不整形状を含めておかないと軸圧縮方向の変形モードしか得られないので、これを線形座屈解析の一次モードとし、その最大振幅を 0.01mm として与えた。これも分岐点の解決法の一つである。

3. 3 材料特性

芯ブレースの材質には SS400 を想定し、表 1 の特性を有するバイリニア型を仮定した。補剛材のヤング率 E_c は、芯ブレースの座屈を十分拘束できるように芯ブレースのヤング率 E_1 の 1000 倍と 100 倍の弾性体と設定した。

4. 解析結果

L=880 鉄筋ブレースの分岐経路追跡法検証の成果を受け、引き続き補剛材を付けた座屈拘束ブレースで変位制御法と弧長制御法による解析を試みた。昨年度の研究⁽⁵⁾や前報⁽⁶⁾のモデルにおいて、解は接触問題を含むため発散しや

表 1 材料特性

ヤング率 (E_1)	206 GPa
降伏応力 (σ_y)	261 N/mm ²
第二勾配 (E_2)	0.01 E_1
ポアソン比 (ν)	0.3

すく、収束させるための条件設定がモデルにより異なり、静的解法では試行錯誤が多くなると考え、ここでは時刻歴応答解析を適用した。

4. 1 補剛材のヤング率 $1000E_1$ モデル

昨年度のモデルと同じく補剛材のヤング率 E_C が芯ブレースのヤング率 E_1 の 1000 倍として、ブレースと補剛材の間隔 e を新たにパラメータにして、このときの圧縮荷重—変位線図を図 7 のように求めた。

図中の $e=300\text{mm}$ は軸方向変位が 20mm までの範囲では補剛材と芯ブレースが接触することがないため、図 5 と同様な補剛材のない芯ブレースのみの解と完全に一致している。

また、 $e=22\text{mm}$ 未満で解は軸方向変位が 6mm 前後を超えると計算が停止（反復計算が収束せず計算が破綻）することを示している。これは

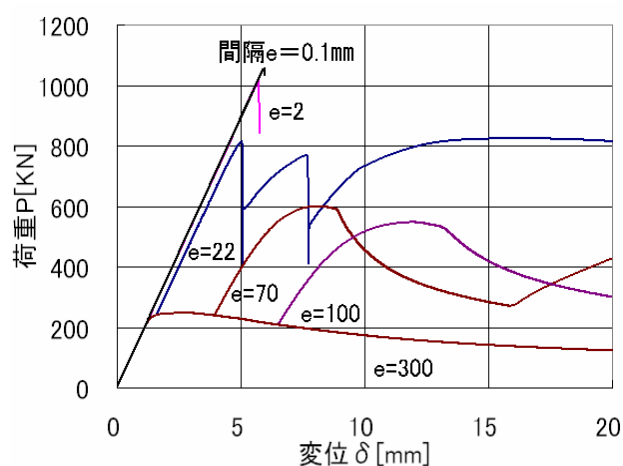


図 7 $E_C=1000 E_1$ の間隔 e による荷重—変位線図

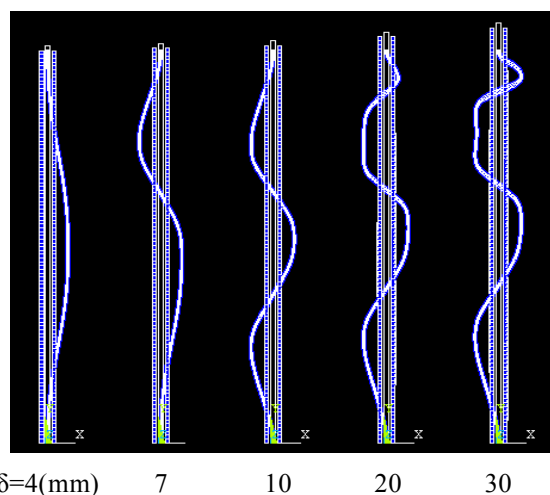


図 8 間隔 $e=22$ における変位—変形モード図

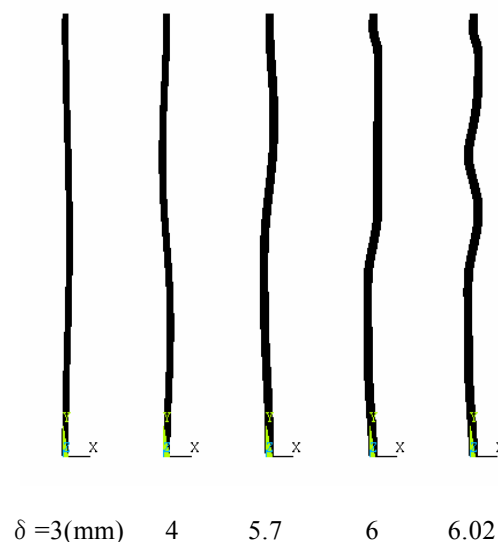


図 9 間隔 $e=0.1$ における変位—変形モード図

収束できない分岐点に出会ったものと考えられる。なお、このモデルの理論上の降伏荷重 P_y は 1055.8kN、線形座屈荷重 P_{cr} は 253.5kN であり、このときの図中の数値は解析結果の出力の反作用値を示している。

図 8 は間隔 $e=22\text{ mm}$ における変位—変形モード図を示しており、図 9 は $e=0.1\text{mm}$ のモデルのそれである。 $e=0.1\text{mm}$ のモデルでは図 7 に示すように降伏荷重に達しており、このときの図 9

の変位 δ は 6.02mm で 5 次の変位モードまで移行している。これに対し、 $e=22$ mm のモデルでは同図 7 に示すように降伏荷重まで進まず、図 8 の変位 δ は 10mm で 3 次の変位モードである。

これらのことから、弾性域内で 5 次の変位モードまで分岐させることができれば、ほぼバイリニアの履歴を示し、望ましいエネルギー吸収特性が得られる可能性があることを示唆している。

なお変形モード図は、出力時に相対的に変形量大きい芯ブレース部の変形後の軸方向長さがほぼ一定となるように、正規化されているものをそのまま並べてある。また、変形モードを明確にするため出力後にさらに図 8 では 450 ～20 倍に、図 9 では 400 ～350 倍に拡大処理して示してある。

4. 2 補剛材のヤング率 $100E_1$ モデル

補剛材のヤング率 E_c が芯ブレースのヤング率 E_1 の 100 倍として、図 7 と同様にブレースと補剛材の間隔 e をパラメータにして、このときの圧縮荷重—変位線図を求めた。この結果を図 10 に示す。

なお、 $e=300$ mm は図 7 と同一値で、 $e=22$ mm 以下は比較のために示した。図 10 より $e=0.1$ mm のときに再現させたい荷重—変位線図が得られたことを示している。図 11 はこのときの

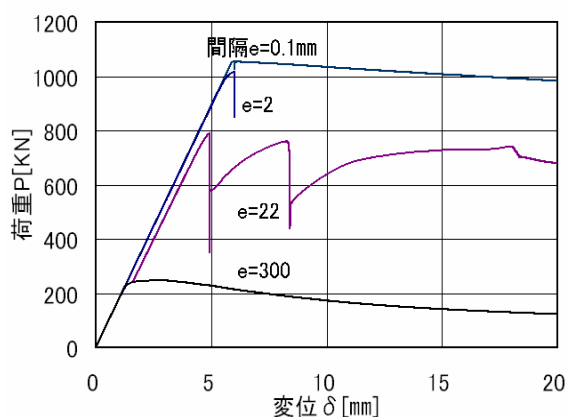


図 10 $E_c=100 E_1$ の間隔 e による荷重—変位線図

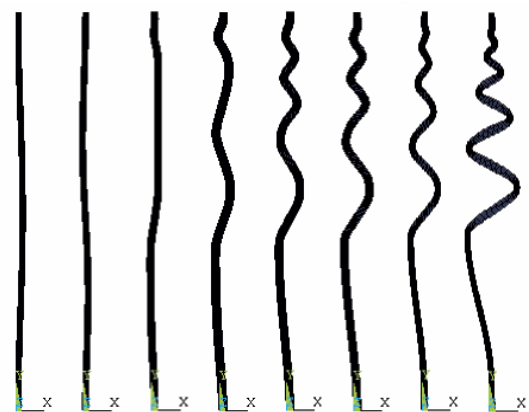


図 11 $E_c=100 E_1$ の間隔 $e=0.1$ における変位—変形モード図

図 11 $E_c=100 E_1$ の間隔 $e=0.1$ における変位—変形モード図

変位—変形モード図である。図 9 と比較すると 5 次の変位モードから 6,7 次の変位モードへと分岐しており、このためには適切な剛性の存在があることを示唆している。この場合も弾性域内では 5 次の変位モードまで分岐しており、エネルギー的に安定な高次のモードに分岐するモデルが得られた。

5. 変位制御法との比較

前項の結果は時刻歴応答解析を適用して得られた解ではあるが、前報⁽⁶⁾までのモデルから分岐を促進させる突起形状をはずし、補剛材との隙間 e と補剛材の剛性をパラメータにしたモデルに変更して解析を進めたものである。これらのパラメータは、時刻歴応答解析を試行して得られた結果からヒントを得て検討したものである。すなわち、従来のモデルに対して解析を進めるには収束しにくい条件が重なり、数値解析モデルの設定に問題があったといえる。そのため、前項のモデルを用いれば変位制御法か弧長制御法でも解析が可能であることが推定できる。

そこで、本項では図 7 の $E_c=1000 E_1$ における間隔 $e=22$ mm のモデルが興味ある履歴をとっているのを、このモデルを比較対象にして変位

制御法により解析して、今後のモデリングの指針とすることにした。

5. 1 解析時のサブステップ数

汎用コード ANSYS では非線形解析⁽⁸⁾時に荷重増分により解析を進める。解析の上位レベルは荷重ステップで構成され、各荷重ステップ内では、荷重が分割され徐々に与えられる。その分割荷重が与えられる区間をサブステップという。

さらに実際に計算が行われる作業単位として平衡イタレーションがある。これは1個または複数個のイタレーションにより、1 サブステップが構成される。このイタレーションが収束することで、サブステップ終了時に解を得ることができる。

このオプションは前項までの時刻歴応答解析（動解析）においても重要であるが、本項の静解析においても適切な役割を果たす。このオプションは解析時間とハードウェアのメモリ制限により拘束を受けるので、付録 A、B に示すようにジョブの分割処理などの手法を導入して対応した。なお ANSYS では、このサブステップ数を次のコマンド(NSUBST)で与えている。

NSUBST, NSBSTP, NSBMX, NSBMN, Carry

ここで、NSBSTP は現在の荷重ステップで用いるサブステップ数（自動時間ステップ機能を用いているので第1サブステップのサイズ）、NSBMX は使用されるサブステップ数の最大数（すなわち、最小時間ステップサイズ）、NSBMN は使用されるサブステップ数の最小数（すなわち、最大時間ステップサイズ）、Carry はこのとき OFF で各荷重ステップの開始時に、時間ステップとして NSBSTP を用いる。

ここでは、通常の問題で用いているケース1 (NSUBST, 1E1, 1E3, 1E1) の条件から始め、順次状況に応じて増加（ケース2）変更し、図7に近い結果（ケース3）を最終とした。

5. 2 ケース1 (NSUBST, 1E1, 1E3, 1E1)

変位 9.1mm で解析がエラーでストップした。このときの解析結果を図12に荷重—変位線図を、図13にこの変位—変形モード図を示す。図12において5.2~9.1mmの範囲で荷重解が振動しているが、図13の変形モード図においてはそれが大きく反映しているわけではない。

エラーの原因としては、複数の要因が挙げられるが、ここでは荷重をゆっくりと適用する手

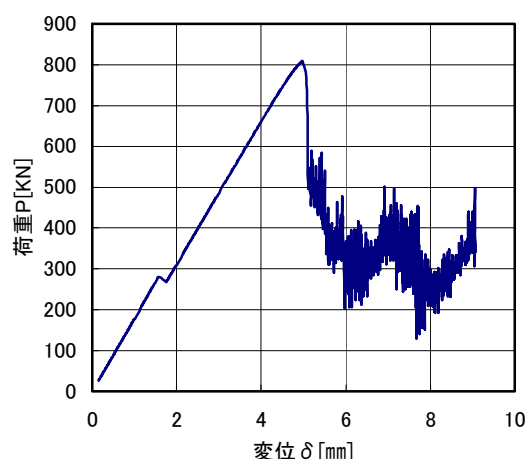


図12 ケース1 (NSUBST, 1E1, 1E3, 1E1) による荷重—変位線図

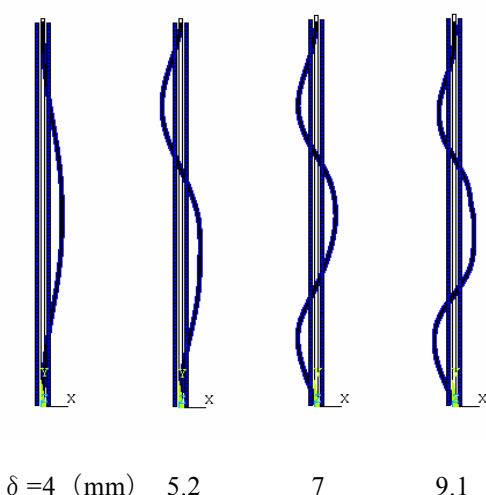


図13 ケース1 (NSUBST, 1E1, 1E3, 1E1) における変位—変形モード図

段、すなわちサブステップ数を増やことでエラーに対応することにした。

5. 3 ケース 2 (NSUBST,1E2,1E5,1E2)

ケース 1 が収束せずに終了し、得られた荷重—変位図において 5.2mm 以降の解析結果が振動しているため、5mm までの結果を用い、これ以降をリスタート機能を用いたコマンドファイルを作成して、サブステップ数を NSUBST,1E2,1E5,1E2 で解析した。図 14 にこのときの荷重—変位線図を、図 15 に変位—変形モード図を示す。

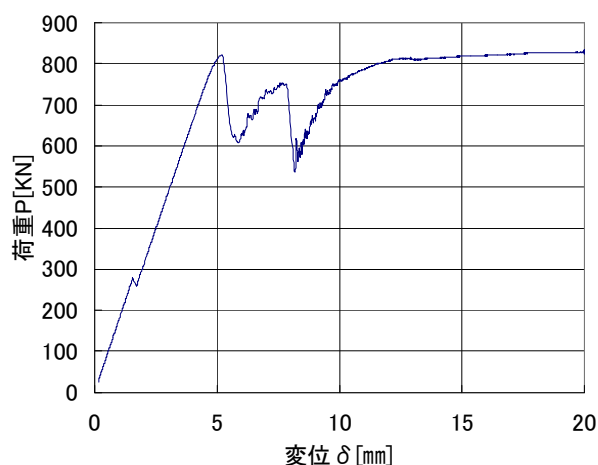


図 14 ケース 2 (NSUBST,1E2,1E5,1E2) による荷重—変位線図

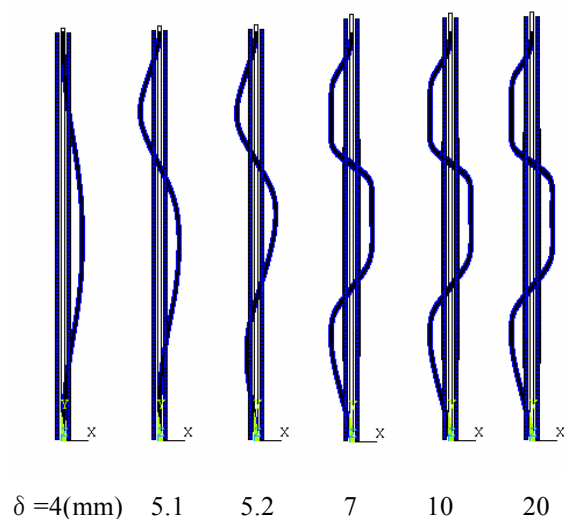


図 15 ケース 2 (NSUBST,1E2,1E5,1E2) における変位—変形モード図

5. 4 ケース 3 (NSUBST,1E3,1E9,1E3)

ケース 2 で得られた図 14 においてとくに 5～10mm の範囲で荷重解が微小ながら振動しているため、時刻歴応答解析と同じサブステップ数を用いたケース 3 を実施して図 16 と図 17 を得た。この解析においてもケース 2 と同様にケース 1 の 5mm までの結果を用い、これ以降をリスタート機能により得たものである。

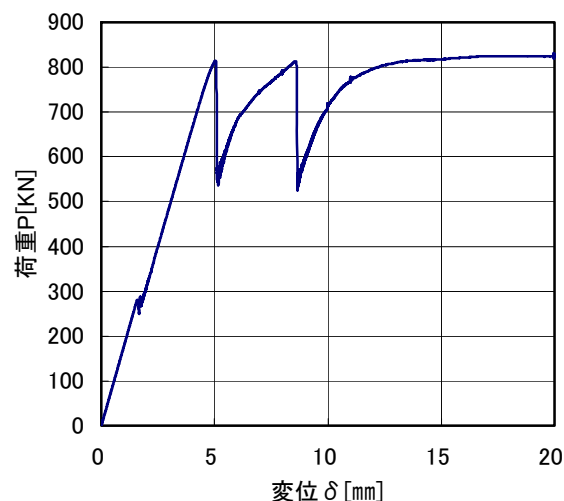


図 16 ケース 3 (NSUBST,1E3,1E9,1E3) による荷重—変位線図

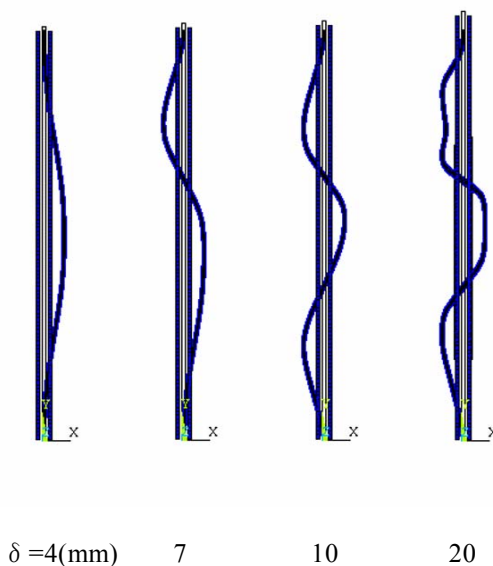


図 17 ケース 3 (NSUBST,1E3,1E9,1E3) における変位—変形モード図

念のため、このリスタート機能を用いた結果と当初からケース 3 の条件で得た結果を比較したところ、これらは同一になることを確認した。

このことから、解析時間節約のためには必要に応じたサブステップ数を与えることでも、妥当な解が得られることが分かる。しかし、解がどのようになるか分からない試行錯誤時には、これを予測するのはソフトウェア特有の問題もあり、一般的に困難である。本問題のような非線形性が強い解析で、ケース 3 の処理結果を得るには、通常のパソコンでは数日間を要する。また 32bit OS では、仮想メモリ空間が 4GB であるため、カーネル空間の 1GB を除くとユーザーが利用できるメモリ空間は 3GB までとなる。この制約が連続処理を困難にするため、多数のサブステップ数を非常に短い時間で区切って、これを何度も繰り返す処理が必要になる。そのため、これらの対応を単純に避けるにはコストを要するが bit 数の大きな OS を用いればよいことは明白である。

変位制御解析から得られた図 16 と時刻歴応答解析から得られた図 7 を比較すると変位が 5 ～10mm の範囲で、慣性力などの影響と考えられる多少の差異があるが、本質的には同一結果であるとみなせる。また図 17 と図 8 の変位—変形モード図においても同様に判断できる。

本問題では当初、解析に対する情報が不足していたこともあり、解析モデルの問題なのか解析手順の問題なのかの識別も困難であった。そのため、かなりの試行錯誤を経てここまでどり着いたが、モデル化のための指針も解析手順もかなりの情報を得ることができた。これらの結果から、本モデルについては今後補剛材の支持方法等をさらに実物に近い条件にすることを検討すれば、変位制御法の解析を中心にした比較的少ないサブステップ数で解析できる紡錘型の履歴特性を有するモデルができるものと考えられる⁽⁹⁾。

6. まとめ

- (1) 本研究の問題を各種の手法で分岐経路追跡を試み、時刻歴応答解析により、基本モデルでの荷重—変位線図を得ることができた。
- (2) 分岐経路追跡手法を比較して、本報告のモデルでは変位制御法を適用することが解析資源の関係で有利であることを確認した。
- (3) 芯ブレースと補剛材との間隙および補剛材の剛性が分岐に影響することを明かにした。

参考文献

- [1] 日本建築学会 構造委員会：「鋼構造制振技術の現状と設計指針への期待（鋼構造における制振のこれから）」、2006 年日本建築学会大会パネルディスカッション資料、2006 年 9 月、pp. 1-52
- [2] 日本建築学会 振動運営委員会等：「振動制御と新しい展開（交通振動から地震まで）」、シンポジウム資料、2007 年 12 月、p.2
- [3] 栗山、吉田：「アンボンドブレース解析のための有限要素法による非線形問題（座屈・弾塑性問題の検証と接触問題の検討）」、職能総合大東京校紀要. 21 号、2006 年 2 月、pp.48-58
- [4] 吉田、栗山：「有限要素法によるアンボンドブレースの接触解析（その 1 芯ブレース突起による不均一性がモード分岐に及ぼす影響）」、日本建築学会学術講演梗概集 C-1 構造Ⅲ、2006 年 9 月、pp.875-876
- [5] 栗山、吉田：「座屈拘束ブレースの多モード分岐」、ANSYS Conference 2006 Japan、2006 年 11 月、pp.28-1 -28-7
- [6] 栗山、吉田：「座屈拘束ブレースに関する分岐経路追跡法」、職能総合大東京校紀要. 22 号、2007 年 2 月、pp.10-19
- [7] 栗山、吉田：「座屈拘束ブレースの分岐経路追跡」、ANSYS Conference 2007 Japan、2007 年 11 月、機械・構造プログラム
- [8] （株）サイバネットシステム：「ANSYS 構造非線形セミナー」、2004 年 9 月
- [9] K.YOSHIDA and Y.KURIYAMA : BIFURCATION PHENOMENA OF RESTRAINED BRACES(BRB) : CIMS2008 : 投稿中