

< 研究ノート >

座屈拘束ブレースの接触解析に及ぼす メッシュサイズの影響

Influence of Mesh Size on the Contact Analysis of Buckling-Restrained Braces

職業能力開発総合大学校東京校

栗山好夫
吉田競人

座屈拘束ブレースの接触解析に及ぼすメッシュサイズの影響

職業能力開発総合大学校東京校 栗山好夫
吉田競人

Influence of Mesh Size on the Contact Analysis of Buckling-Restrained Braces

Yoshio KURIYAMA, Keito YOSHIDA

要約 有限要素法による座屈拘束ブレースの解析では、静的解析においても、幾何学的非線形形としての大ひずみ・大変形と材料非線形としての弾塑性および状態変化としての接触問題が存在する。そのため、解析において膨大な計算処理時間を要している。このため、今後の繰返し軸方向荷重や地震動による挙動解析を進めるにあたっては、問題の質に応じて可能な限り自由度の少ないモデルを用いることが要求される。

本報告は、これまでの研究で得られた解の収束性を満足する解析モデルを基準として、メッシュサイズが荷重-変位線図と軸変形モード図に及ぼす影響を検討したものである。その結果、解析に必要な計算処理時間にはメッシュサイズと共に解析ステップ数の設定も大きく影響することが明確になり、荷重-変位関係や芯ブレースのモード変遷の追跡などの解析目的に応じてこれらを使い分けることにより、効率的な解析結果が得られるという知見が得られた。

I 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^{(1)~(9)}。その研究分野の広がりにより1998年に米国で紹介され、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るに至った⁽¹⁰⁾。

振動制御技術を分類すると、耐震 (剛構造と柔構造)、免震 (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⁽¹¹⁾。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、制御機構としては図1左図のような弾塑性ダンパの履歴減衰型 (変位型) になる。

図1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図2に

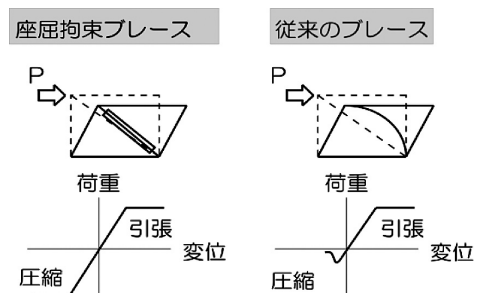


図1 ブレースの荷重-変位特性

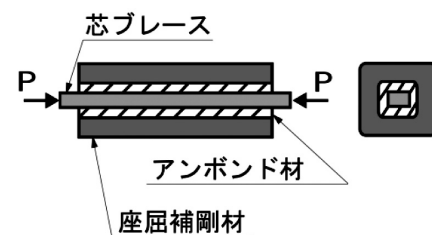


図2 座屈拘束ブレースの構造

示す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、これにより軸剛性の増大をもたらす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。図3はK型ブレースとしての適用例である。

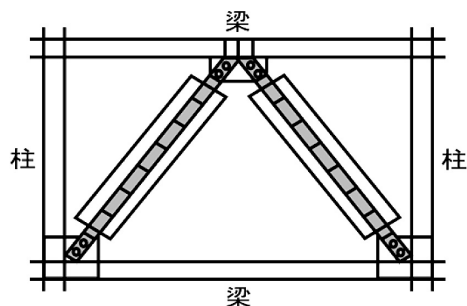


図3 座屈拘束ブレースの適用例

座屈拘束ブレース (BRB) の体系的な理論は簡略化したモデルを基に様々な実験を通し考察されているが、補剛材を含むBRBの有限要素 (FEM) 解析による挙動の再現は未だ適切には行われていない。FEM解析でブレースの挙動が再現できれば今後種々の細長比のブレースや補剛材の間隙の影響などを探ることが可能となり理論構築の一助となるほか、時間と費用の効率化を図ることが可能となる。

著者ら^{(12)~(16)}はこのために、補剛材と芯ブレースの間隙や補剛材の剛性などのパラメータを含めた解析を行い、芯ブレースに生じる波状の変形を再現するとともに、補剛材の必要剛性を解析的に求め、提案してきた。

しかしながら解析には多大な時間を要することから、本報告では、これまでの研究で得られた解の収束性を満足する解析モデルを基準として、今後の解析処理時間を短縮するためにメッシュサイズやサブステップ数が荷重-変位線図と軸変形モード図に及ぼす影響を検討したものである。

II 基準モデルによる既往の研究成果^{(12)~(16)}

この章ではこれまでに行われた基準モデルの解析手法とその結果について簡単に説明を行うことにする。

1 解析概要

本研究の解析対象である座屈拘束ブレースのモードの分岐を追跡するために、有限要素法解析においては、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) を考慮した。解析には

汎用解析コードANSYS Rel.11.0を用い、分岐経路追跡を行うために変位制御法を採用した。

1-1 非線形解析手法

非線形問題の反復解析にはNewton-Raphson法を用いた。収束方法は、各イタレーション毎に接線剛性マトリックスおよび残差を更新し、設定した収束基準より残差が下回ったとき収束達成とした。

1-2 接触問題の解析手法

接触解析の解法には、接触の適合性を定義し平衡状態を達成し、食い込み許容量が許容範囲内になるまでイタレーションを繰り返すペナルティ法とラグランジュ乗数法を組み合わせたペナルティ+ラグランジュ法を用いた。本接触解析における食い込み許容量は芯ブレース要素の0.1倍の距離と設定している。対象とした芯ブレースの厚さは45mm、要素分割は5としているため一要素の厚さは9mmであり、本解析において設定した食い込み許容量は0.9mmである。

2 基準解析モデル

図4に基準解析モデルの形状寸法を示す。芯ブレース形状および補剛材形状は過去の実験⁽⁸⁾を参考にそれぞれ45×90×4680、40×90×4660とした。芯ブレース材料特性はバイリニア、降伏応力度は261N/mm²、第2勾配 (E₂) は第1勾配 (E₁) の1/100、ヤング係数は206GPaとした。芯ブレースと補剛材の間隙はe=0.1mmとした。補剛材のヤング率 (E_c) は全体座屈を拘束するために芯ブレースのヤング率 (E_i) の6倍と十分な値を与え、補剛材の降伏強度は芯ブレース降伏強度の0.1倍とした。芯ブレースの初期不整形は線形座屈解析により得られた一次モードと仮定し、その中央最大振幅を0.01mmとして与えた。また補剛材同士のx方向変位にはカップリングを指定し同一変位を生じるようにしている。図5は芯ブレースの要素分割 (例として横方向3要素分割のときのアスペクト比 a : b の場合) の説明と解析に採用した2次の変位関数をもつ2次元8節点高次要素 (PLAN183) を示している。

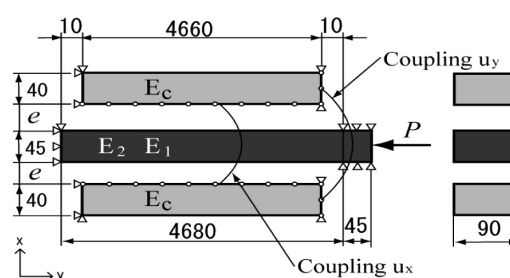


図4 解析モデル

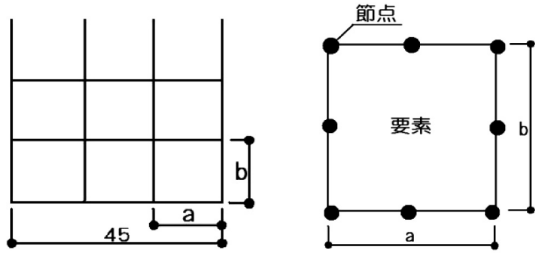


図5 アスペクト比 (a : b) と2次元高次要素

3 高次変形モード

図6は前述の解析仮定に基づいて得られた荷重-変位線図である。横軸、縦軸はそれぞれ軸方向変位と圧縮軸力を示す。引張軸力が作用した場合と同じく、降伏強度に達した後塑性変形を生じ、引張と同様な挙動を示している。図7はこの時の軸変形モード図である。 δ は軸方向変位量 (mm) を示す。この変形は非常に僅かであるために図示に当たっては100~300倍に拡大している。左から右に向うにつれ、荷重が増加し変形が進んだモードの状態を示している。モードの移り変わりは次のとおりである。軸変位の増加とともにブレス後、モードはS字の2次モードに分岐する ($\delta=5.5$ mm)。中央部が座屈し、補剛材に接触する ($\delta=4$ mm)。

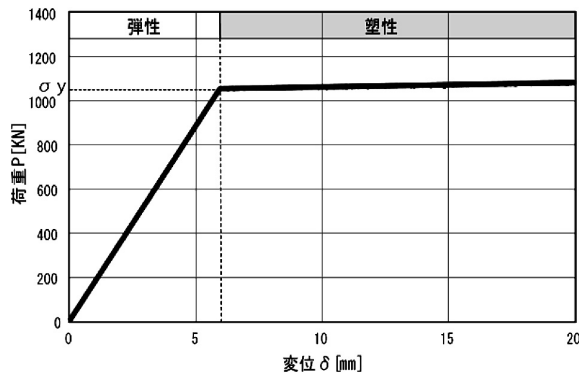


図6 芯ブレスの荷重-変位線図

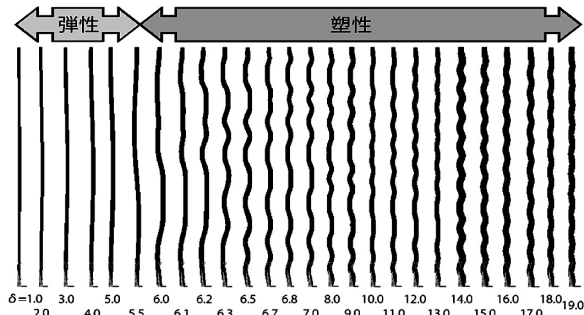


図7 変形モードの移行

その降伏強度に達した後は、軸変形の増加とともにモード次数が高次モードに移行し、 $\delta=20$ mmにおいては波状のモードがブレスに一樣に生じた。この分岐追跡は、これまで報告されている実験結果⁽⁸⁾を再現している。

4 補剛材曲げ剛性と降伏強度の影響

補剛材剛性と補剛材曲げ強度が座屈ブレスの挙動に与える影響を求めするためにこれらをパラメータとし、解析を行った。解析モデルは図4に示すモデルと同様である。解析パラメータとして補剛材剛性と補剛材曲げ強度を基準とした。補剛材片側の曲げ剛性比 S と曲げ強度比 YF は

$$S = \frac{E_C I_C}{E_B I_B} \quad (1)$$

$$YF = \frac{Z_C \sigma_C}{Z_B \sigma_B} \quad (2)$$

ここで、 I は断面二次モーメント、 E はヤング率、 Z は断面係数、 σ は降伏応力であり、添字の C と B はそれぞれの補剛材と芯ブレスをあらわしている。

図8はいくつかの曲げ剛性比 S と曲げ強度比 YF をパラメータとし解析を行い、必要剛性条件を求めた中からその挙動を4種に区別したタイプの荷重-変位図を示したものである。図中の横軸はブレスの軸方向変位、縦軸は芯ブレスに作用した軸方向荷重である。

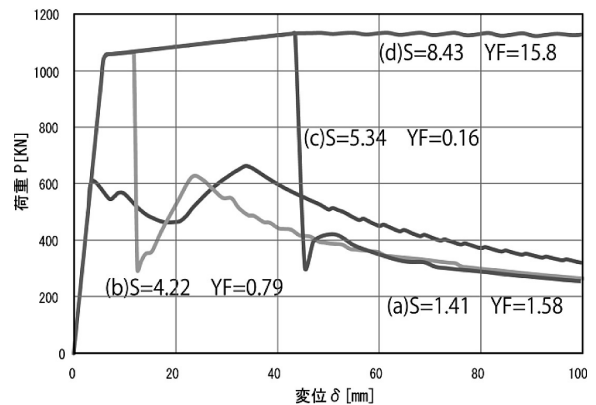


図8 曲げ剛性比と曲げ強度比 YF による荷重-変位線図

表1と図9は、基準モデルに対して S と YF を変化させて得られた解析結果である。図9の横軸は曲げ剛性比 S を示し、縦軸は対数軸とした曲げ強度比 YF である。図表中履歴タイプI (×)は一次モード形状を呈し芯ブレスの降伏強度に達しないもの、履歴タイプII (▲)は補剛材曲げ強度を高めることによりブレス

ス降伏強度に達し塑性変形を生じるがモードは1次モードに留まるもの、履歴タイプⅢ(■)は高次モードを呈し1%未満程度のひずみが生じるもの、履歴タイプⅣ(◆)は高次モードでひずみが1%を超えるものを示す。なお、図9における境界は定性的な表示である。

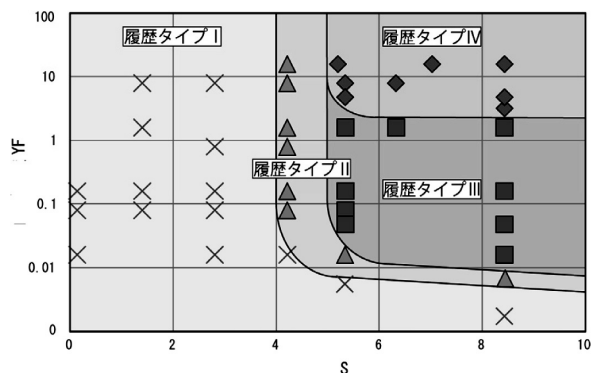


図9 曲げ剛性比Sと曲げ強度比YFによる荷重-変位線図

表1 履歴タイプとモード種別

| 履歴タイプ | I x | II ▲ | III ■ | IV ◆ |
|---------|--------------|-------------|-------------|---------------|
| モード種別 | (a) 1次モード | (a) 1次モード | (b) 高次モード | (b) 高次モード |
| 荷重-変位線図 | 降伏点に達しない (a) | 降伏点に達する (b) | 降伏点に達する (c) | 降伏棚が2%生じる (d) |

Ⅲ 解析モデルの解析時間に及ぼす影響

1 解析時間

図8に示すように荷重-変位曲線の挙動は、前章までの基準モデルを用いることで2%ひずみ(δ=100mm)まで得られているが、これらの解析に通常1~3週間の計算時間を要し、この解析時間の膨大さが今後の展開のために大きな問題となっている。なお現在解析に用いているマシンの性能は下記である。

解析マシンの性能

OS:Windows XP×64 SP2

CPU:Quad Q9550 @2.83GHz

RAM:8.0GB

2 メッシュサイズとサブステップ数によるBRBの挙動と解析時間

前章で述べた基準モデルにより得られた解析結果を基に、ここではメッシュサイズとサブステップ数の影響を考察することにした。

2-1 メッシュサイズと解析時間

表2の左端柱欄の記号(解析モデル名)は、中央の数字2が後述するサブステップ数1E2(100)を意味して、右端の数字4は前章で区別した履歴タイプⅣを表している。表の解析モデルは、この2つの条件を一定としてA記号で示される前章で解析してきた基準モデルと3種(B、C、D記号)のメッシュサイズを変更したモデルを示す。ここでは解析時間の短縮化を図るためにメッシュサイズを考慮できる範囲で最大限大きくして、要素数・節点数を少なく(自由度数を減少)したモデルについて、その解析時間、荷重-変位図および軸変形モード図を比較したものである。解析終了変位を0.5%ひずみ(ここではδ=20mm)と制限したのは、芯ブレースが塑性応力に達し、モード次数も十分高次になると判断したためである。この目的に限定して解析時間がより少ない、妥当な形状を有するモデルを作成することになる。ここで、表中の要素とアスペクト比等は図5に準じているが、基準のAモデルは横方向5要素分割であり、B、C、Dモデルは限界となる(x方向の圧縮と引張の曲げ応力を表現するため)2要素分割でのメッシュサイズを検討した。

表2より軸方向変位20mmまでなら、基準モデルとしたA-2-4モデルに対して、芯ブレース横方向を2要素分割にして、さらにアスペクト比も落として自由度数を大きく縮減したB、C、Dモデルでも荷重-変位図と軸変形モード図はほぼ等しいことが分かる。(表中軸変形モード図におけるブレース幅が異なるように見えるが、これは変位出力図の倍率を見やすくするため処理時に適宜変えたためである。)

なお、これ以上の軸方向変位に対してB、C、Dモデルではそれぞれ異なる変位で解の収束が困難となり、2%ひずみ(δ=100mm)まで達することできず、Bモデルでは変位δが27.8mm、Cモデルでは31.1mm、Dモデルでは35.5mmで解が発散した。

表2 メッシュサイズによるBRBの挙動と解析時間の比較

| モデル | メッシュサイズ (アスペクト比a:b) | 9x9 (1:1) | 荷重(kN)-変位(mm)線図 | 軸変形モード図 $\delta=4.5,5.6,2.6,3.6,7.7,11.1,14.20$ |
|-------|------------------------|---|-----------------|--|
| | A-2-4 | 要素数 2,600 | | |
| | 節点数 8,936 | 0 5 10 15 20 | | |
| | 解析時間 525時間24分 | | | |
| B-2-4 | メッシュサイズ (アスペクト比a:b) | 22.5x30 (1:1.33) | 荷重(kN)-変位(mm)線図 | 軸変形モード図 $\delta=4.5,5.6,2.6,3.6,7.7,11.1,14.20$ |
| | 要素数 314 | 1200 1000 800 600 400 200 0 | | |
| | 節点数 1,269 | 0 5 10 15 20 | | |
| | 解析時間 131時間20分 | | | |
| C-2-4 | メッシュサイズ (アスペクト比a:b) | 22.5x45 (1:2) | 荷重(kN)-変位(mm)線図 | 軸変形モード図 $\delta=4.5,5.6,2.6,3.6,7.7,11.1,14.20$ |
| | 要素数 208 | 1200 1000 800 600 400 200 0 | | |
| | 節点数 845 | 0 5 10 15 20 | | |
| | 解析時間 89時間14分 | | | |
| D-2-4 | メッシュサイズ (アスペクト比a:b) | 22.5x7.5 (1:3) | 荷重(kN)-変位(mm)線図 | 軸変形モード図 $\delta=4.5,5.6,2.6,3.6,7.7,11.1,14.20$ |
| | 要素数 140 | 1200 1000 800 600 400 200 0 | | |
| | 節点数 573 | 0 5 10 15 20 | | |
| | 解析時間 60時間25分 | | | |

表3 サブステップ数によるBRBの挙動と解析時間の比較

| モデル | サブステップ数 SBSTP=NSBM | 荷重(kN)-変位(mm)線図 | 軸変形モード図 $\delta=4.5,5.6,2.6,3.6,7.7,11.1,14.20$ |
|-----|-----------------------|-----------------|--|
| | A-1 | | |
| | 解析時間 525時間24分 | 0 5 10 15 20 | |
| A-2 | サブステップ数 SBSTP=NSBM | 荷重(kN)-変位(mm)線図 | 軸変形モード図 $\delta=4.5,5.6,2.6,3.6,7.7,11.1,14.20$ |
| | 1 E 1 | | |
| | 解析時間 477時間16分 | 0 5 10 15 20 | |
| A-3 | サブステップ数 SBSTP=NSBM | 荷重(kN)-変位(mm)線図 | 軸変形モード図 $\delta=4.5,5.6,2.6,3.6,7.7,11.1,14.20$ |
| | 1 E 0 | | |
| | 解析時間 231時間12分 | 0 5 10 15 20 | |

2-2 サブステップ数と解析時間

表3は解析時に指定するサブステップ数による影響を、A-1 (⇒A-2-4) 記号で示される基準モデルの初期値100 (1E2) から10 (1E1) にしたA-2 (⇒A-1-4) モデルと1 (1E0) にしたA-3 (⇒A-0-4) モデルを比較したものである。これらも変位20mmまでなら基準モデルのA-1モデルとほぼ等しい結果が得られ、設定値に応じて解析時間が少なくなっていることが分かる。しかし、変位(ひずみ)を20mm (0.5%) 以上大きくとろうとすると、小さいサブステップ数ほど収束が早く困難となる。

なお、表中のサブステップ数SBSTP (NSBST) =NSBM (プログラムで用いる命令) は、次を意味している。

汎用コードANSYSでは非線形解析時に一般に荷重増分(本モデルでは変位増分に相当、この変位増分を0.1mmに設定)により解析を進め、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。

このオプションはとくに時刻歴応答解析(動解析)において重要であるが、本報告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本研究では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。

3 履歴タイプによるBRBの挙動と解析時間

基準モデルでは解析終了変位を20mmまでとしたとき、指定するサブステップ数による荷重-変位図と軸変形モード図について影響がなかったことから。次に履歴タイプによるメッシュサイズの比較検討を行うことにする。ここでは挙動変化の大きい履歴タイプIIを用いる。図8において、降伏強度まで達しながら変位 δ が20mm前に全体座屈を生じる解析モデル(b)は、図9と表1で示す履歴タイプIIの代表的なモデルであ

る。表4はこの条件 (S=4.22、YF=0.72) について、表2に示すA~Dモデルを適用した結果を示すもので、この条件においてもA~Dモデル (SBSTP (NSBST) =NSBM=100:一定) は δ が20mmまでであれば、それぞれのモデルにおいて解析が可能であることが分かる。表5は、表4におけるC (C-2-2) モデルにおいてサブステップ数SBSTP (NSBST) =NSBMを10に減少させたC-1-2モデルと1に減少させたC-0-2モデルについて比較したものである。表中のC-0-2モデルは、サブステップ数の不足により解は得られるが十分なサブステップ数のものと比較すると異なる挙動を示す可能性があることを示唆している。サブステップ数の不足により解が収束せず中断してしまえばエラーとして理解できるが、このように解が得られてしまう場合もあるため、常に得られた結果が妥当であるか否かを判断できるようにパラメータを振りなおして、解の妥当性を判断する必要がある。

本報告のモデルではこれらの結果からサブステップ数の最小値は10とすることとしている。

当初の解析⁽¹²⁾で解の収束ができない原因は、分岐経路追跡法⁽¹³⁾、芯ブレースと補剛材との隙間 (距離)、要素数やサブステップ数の不足、アスペクト比、剛性や降伏強度等の適切な条件選択の問題が複雑に絡んでいたためであった。著者らはこれらの問題を解決する

ためかなりの試行錯誤を経て、モデルにかかわらず安定した解析を実行できるようにしてきた^{(12)~(16)}。この成果が基準解析モデル (以降A-2-Oモデルとして使用) であるが、このモデルをすべての解析に用いると、この必要がない条件のところ (例えば、変位20mmまでの解析) でも解析時間を要しているという知見が得られた。

表5 Cモデルにおけるサブステップ数によるBRBの挙動と解析時間の比較

| モデル | サブステップ数 SBSTP=NSBM | 荷重(kN)-変位(mm)線図 | 軸変形モード図 $\delta=4,5,5.6,2.6,3.6,7.7,11,14,20$ |
|-------|--------------------------|--------------------------|--|
| | C-2-2 | 1 E 2 解析時間 59時間15分 | |
| C-1-2 | 1 E 1 解析時間 36時間01分 | | |
| C-0-2 | 1 E 0 解析時間 10時間22分 | | |

表4 A~Dモデルの履歴タイプIIによるBRBの挙動と解析時間の比較

| モデル | メッシュサイズ (アスペクト比a:b) | 要素数 | 節点数 | 解析時間 | 荷重(kN)-変位(mm)線図 | 軸変形モード図 $\delta=4,5,5.6,2.6,3.6,7.7,11,14,20$ |
|-------|------------------------|--------------|-------|---------|-----------------|--|
| | A-2-2 | 9x9 (1:1) | 2,600 | 8,936 | 294時間16分 | |
| B-2-2 | 22.5x30 (1:1.33) | 316 | 1,269 | 64時間0分 | | |
| C-2-2 | 22.5x45 (1:2) | 210 | 845 | 59時間15分 | | |
| D-2-2 | 22.5x67.5 (1:3) | 142 | 573 | 41時間21分 | | |

そのための解決方法の一つとして考えられるのは、人為的な操作をかなり必要とするが、まず解析範囲 (変位の量) を小さくしてステップ毎に外部ファイルへ出力させ、どこからでもリスタート (再計算) できるようにすることである。とくに収束できずに計算処理が強制終了してしまったステップについては、その1つ前のファイルを読み込み、サブステップ数の条件を変更 (一般的には増加) して、収束できるまでこれを人為的に変更して繰り返し、その後サブステップ数を減少させて、最終的な変位までこれらを繰り返すことである。これは解析をモニタリングしながらフィードバックしていくため、計算機そのものの処理時間は少なくなるが、操作は煩雑になる。

今後予定されている圧縮と引張りの繰り返し処理では、あまり高度な処理プログラムを用いると、リスタートすべき出力ファイルの読み込み処理において、さらに操作が煩雑になり、場合によってはプログラム修正も伴うため、モニタリング方式で解析を進めるには、

その処理が簡潔になるようなプログラムにすることが必要になる。

IV まとめ

接触を考慮した座屈拘束ブレース解析において、0.5% ($\delta=20\text{mm}$) までの圧縮ひずみの解析に限定するとき、得られた知見は次のようになる。

(1) 芯ブレース横方向5要素分割でアスペクト比が1:1の基準モデルから、横方向2要素分割でアスペクト比1:3まで自由度を減らしても十分な荷重-変位図と変形モード図が得られる(表2と表4)。

このときの解析時間は、基準モデルの約1/8にすることができ、さらにサブステップ数の適切な選択により、10~50%の時間を削減できることが分かった。

(2) サブステップ数の初期値を1にしても芯ブレース横方向5要素分割でアスペクト比が1:1であれば同様に十分な解析ができる(表3)。

(3) 横方向2要素分割でアスペクト比が1:2では、サブステップ数の初期値を1にすると基準モデルにより得られた芯ブレースのモードとは異なる解析結果となる(表5)。基準モデルと同様な結果を得るためには初期値10が必要になる。

(4) 今後の形状の異なる座屈拘束ブレースの解析では初期モデルとして、芯ブレース横方向2要素分割で、アスペクト比を1:3、サブステップ数の初期値を10で実行するとよい。このとき、収束が困難であればサブステップ数を100に増分し、さらに困難なときアスペクト比を1:2へと自由度を増やす方針で効率良く試みることができる。

(5) 1回目の解析モデルで得られた結果は妥当な解でない可能性もあるため、その上位の条件(横方向分割数、アスペクト比およびサブステップ数)で再度試み、解全体の収束性を確認する必要がある。

なお、本報告では解析初期モデルの指針を得ることができたが、本研究のための普遍的な解析モデル作成の指針を得るには到っていない。このために、とくに節点数と解析結果(とくに解析時間)の明確な関係を得るための課題が多く残っている。例えば、芯ブレース横方向2要素分割で、アスペクト比が1:1のモデルや横方向5要素分割で、アスペクト比が1:3以上のモデルがあり、またこれらの中間の横方向3要素分割や4要素分割についても検討しなければならない。

[参考文献]

- (1) 安藤信好、高橋春蘭：「鉄筋コンクリートによりブレースを拘束したアンボンドブレースの基礎的研究」、構造工学論文集 Vol.36B (1990年3月)、pp.219-232
- (2) 佐伯英一郎、岩松浩一、和田章：「有限要素法によるアンボンドブレースの弾塑性挙動解析と実験結果の比較」、日本建築学会論文報告集No.484, pp.111-120、1996年6月
- (3) 桑原進、多田元英、米山隆也、今井克彦：「二重鋼管の補剛性能に関する研究」、日本建築学会論文報告集No.445, pp.151-158、1993年3月
- (4) 竹板和成、長尾直治、田口孝、萩野谷学：「三重鋼管座屈拘束制震ブレースの耐震性能に関する研究(その2:実験結果の考察と有限要素法解析)」、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿) pp.1013-1014、2005年9月
- (5) 加藤基規、宇佐美勉、葛西昭：「座屈拘束ブレースの繰り返し弾塑性挙動に関する数値解析研究」、構造工学論文集 Vol.48A pp.641-648、(2002年3月)
- (6) 宇佐美勉、加藤基規、葛西昭：「制震ダンパーとしての座屈拘束ブレースの要求性能」、構造工学論文集 Vol.50A pp.527-538、(2004年3月)
- (7) 和泉田洋次、川上誠、岩田衛：「鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの有限要素法による弾塑性大変形の解析」日本建築学会論文報告集No.618, pp.207-213、2007年8月
- (8) 吉田競人、安藤信好、三谷勲：「鉄筋コンクリート補剛材によるアンボンドブレースの必要剛性に関する研究」日本建築学会論文報告集No.521, pp.141-147、1999年7月
- (9) 藤本盛久、和田章、佐伯英一郎、渡辺厚、人見泰義：「鋼管コンクリートにより座屈を拘束したアンボンドブレースに関する研究」、構造工学論文集 Vol.34B (1988年3月)、pp.249-258
- (10) 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
- (11) 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
- (12) 吉田競人、栗山好夫：「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の分岐に及ぼす影響」)、日本建築学会大会学術講演梗概集C-1、構造Ⅲ、pp.875-876、2006
- (13) 栗山好夫、吉田競人：「座屈拘束ブレースの座屈と分岐」、2008実践研究発表会、2008年9月、pp.41-42
- (14) 栗山好夫、吉田競人：「座屈拘束ブレースのための有限要素法による非線形問題」、実践教育ジャーナル、2008年12月、pp.74-77
- (15) Yoshida Keito and Kuriyama Yoshio,
" Bifurcation Phenomena of Buckling-Restrained Braces (BRB)", Fifth International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures, Sydney Australia, 23-25 June 2008, pp.175-179
- (16) Yoshida Keito and Kuriyama Yoshio,
" Stiffness and Strength Requirements for Buckling Restrained Brace Cover ", 9th International Conference on Steel Concrete Composite and Hybrid Structures, Leeds UK., 8-10 July 2009