ハイブリッド型応力法による3次元立体骨組構造物の弾塑性崩壊解析プログラム (LAP3D) の開発

DEVELOPMENT OF ELASTO-PLASTIC AND COLLAPSE ANALYSIS PROGRAM OF SPACE FRAMED STRUCTURE BASED ON THE HYBRID STRESS METHOD

稲田祐二 —*1 川端康洋 —*2
近藤一夫 —*3

Yuji INADA —*1 Yasuhiro KAWABATA —*2
Kazuo KONDOH —*3

キーワード:

ハイブリッド型応力法, プログラム LAP3D, 立体骨組構造物, 弾塑性崩壊解析, ティモシェンコ梁・柱理論

Keywords:

Hybrid stress method, Program LAP3D, Space framed structure, Elasto-plastic and collapse analysis, Timoshenko's beam-column theory

Program LAP3D was developed in order to predict the elasto-plastic responses and collapse behavior of space framed structures by the present authors and their colleagues, using the hybrid stress beam-column finite elements based on Timoshenko's beam-column theory, which yield no discretizing errors in their elastic and elasto-plastic responses of the element. In this paper, the concept of development and outline of LAP3D computer analysis system are described with input data menu. Also, several analytical results using LAP3D are shown and verify that LAP3D has excellent capacity to simulate simply and accurately the more complicate behavior of framed structures.

1. はじめに

骨組構造物の弾塑性解析に、従来から広く用いられてきた変位法に基づく梁・柱一次元有限要素を採用した場合、離散化誤差をなくし、十分信頼しうる解を得るためには、塑性化が予想される領域を細かく分割したり、あるいは変位場を高次化する等の何等かの特別の操作が必要となる。これは、要素の長さ方向の断面形状や応力レベルによって時々刻々変化する要素内変位場を、平衡方程式や構成関係式、或いは適合条件式に矛盾がないよう設定するのが困難であるためである。一方、梁・柱一次元有限要素の定式化においてハイブリッド型応力法を用いると、独立な状態量である要素の合応力場が、平衡方程式から、一義的に、又、容易に決定出来るため、弾塑性領域にわたって離散化誤差が全く生じない定式化が可能となる¹⁾。筆者等は、このような特長を有するハイブリッド型応力法梁・柱一次元有限要素をRC造やPS造部材に適用し、弾塑性崩壊解析におけるその有効性を確認すると共に、材料の軟化特性に起因する変形の局所化までを包含した弾塑性破壊解析に於いても極めて有効であることを示した^{2)~4)}。筆者等は、又、こうした成果を基に、本要素を用いた建築骨組構造物の設計等に用いることのできる汎用性をもった3次元立体骨組構造物の弾塑性崩壊解析プログラム (LAP3D)の開発を進めてきたが⁵⁾、材料非線形を考慮した崩壊解析のレベルについては当初の開発計画をほぼ達成したので、ここにその開発成果を報告する。

2. LAP3Dの概要

2.1 開発コンセプト

LAP3Dは、純粋なソルバーの機能のみを有し、プリ・ポスト処理はカードイメージの入出力ファイルを介して実行できるように設計されている。従って、プリ・ポスト処理はユーザーのニーズに応じた開発が可能となる。又、LAP3Dが有するデータ構造は、IOイ

ンターフェイスに関わる外部データとPCのメモリー内で処理される内部データとに区分され、外部データ構造についてはメモリーの節約よりは汎用性を優先する一方、内部データ構造は使用メモリーを少なくするためベクトル化している⁶⁾。

尚、ハイブリッド型応力法は、応力法を変位形に変換した定式化となっているため、LAP3Dの外部データ構造に関しては、従来から開発されている変位法のソルバーに対するプリ・ポストプロセッサとの適合性は非常に高いものとなっている。

2.2 使用要素の概要

LAP3Dで使用する立体梁・柱要素の概要を図1に示す。本要素は、Timoshenko梁理論に基づきハイブリッド型停留コンプリメンタリーエネルギーの原理により定式化されており、そのエネルギー積分は、図中に示すように長さ方向をセグメント分割、断面内 (x-y平面) をセル分割として定義される領域を基本単位として、各領域の材料特性は一定として行っている。要素種別としては、断面をも幾つかのセルに分割した塑性域の拡がりを考慮した要素と、断面をセル分割せず、断面全体として損傷を評価する塑性ヒンジ要素が選択できる。前者の要素に対する一軸材料特性は、bi-linearモデル、多折れ線形コンクリートモデルを用意している。一方、後者の要素については、要素特性が断面で定義される多軸連成の弾塑性モデルとして、降伏関数に6次元の合応力に関する楕円型関数を、硬化則にはZieglerの移動硬化則を採用している。尚、降伏関数に採用する合応力は、1自由度から6自由度までの任意の自由度数が選択可能である。又、近年、その耐震有効性が注目されている半剛接骨組にも十分対応出来るよう、要素の任意の位置に、又、任意の数だけ、ピン接あるいは正負非対称のbi-linear特性の半剛接ばねを挿入出来るようになっている。その際、要素数や節点数を増やすといった操作は、全く必要ない。尚、半剛接ばねの自由度は、6自由度成分の中から任意の成分が選択可能であるが、自由度間の連成は考慮していない。

*1 米子工業高等専門学校建築学科 助教授・工修
(〒683-8502 米子市彦名町4448)

*2 米子工業高等専門学校建築学科 教授

*3 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 助教授・工博

*1 Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Yonago National College of Technology, M. Eng.

*2 Prof., Dept. of Architecture, Yonago National College of Technology

*3 Assoc. Prof., Dept. of Social and Environmental Eng., Graduate School of Eng., Hiroshima University, Dr. Eng.

2. 3 解析対象と入力データの概要

LAP3Dでは、S造、RC造等の各種の立体骨組について、以下の解析を行うことができる。

- ・方向単調荷重解析 ・静的繰返し荷重解析
- ・自由振動解析 ・時刻歴応答解析

入力データの書式は、自由書式入力となっており、コロン（:）に続けてキーワードを入力し、それに続いて一組のデータブロックを入力する。以下に、主なキーワードと対応した入力データブロックの概要を示す。

①解析制御データ

:ANATYP 解析タイプ（方向単調荷重解析、静的繰返し荷重解析、自由振動解析、時刻歴応答解析）の定義

:ANACNTRL 静的繰返し荷重解析の制御（荷重反転回数等）

:RESPONSE 時刻歴応答解析の制御 1（解析開始時間、解析時間間隔、解析ステップ数、出力ステップ間隔、数値積分法種別番号）

:RELEASE 時刻歴応答解析の制御 2（運動方程式に於ける不釣り合いの処理）

②骨組形状の定義データ

:SIZE 骨組規模（総節点数、総要素数、総セグメント分割タイプ数、総セル分割タイプ数、総セルタイプ数、総材質タイプ数、総節点境界条件数、総中間荷重種別数、総半剛接ばね挿入タイプ数、半剛接ばね材料特性タイプ数）の定義

:NODE 節点（節点番号、座標値）の定義

:MEMBER 要素の定義（要素番号、要素タイプ番号、両端節点番号、セグメント分割タイプ番号、中間荷重番号、主軸の傾きデータ、ばね挿入タイプ番号）

③集中質点系振動モデル化データ

:MASS 質点の定義（質量を定義する自由度とその値）

:MODE 固有値解析の制御（数値計算法、求めるモードの次数等）

:DAMPING 減衰マトリックスの定義（種別と減衰定数）

:WAVE 入力波の定義（入力地震波の選択と制御）

④要素断面形状の定義データ

:SEGMENT セグメントの定義

:CELLDIV セル分割タイプの定義

⑤材料特性の定義データ

:CELLTYPE セルタイプの定義（材料種別と特性）

:MATERIAL 材料タイプの定義（セルの材料特性）

⑥境界条件及び荷重条件定義データ

:FORCED 節点境界条件及び節点力の定義（節点荷重と節点拘束又は強制変位）

:LOAD 要素中間分布荷重の定義（分布荷重の形状と大きさ）

⑦半剛接（スカラー）ばね定義データ

:SPRING 半剛接ばねの定義（半剛接ばねの数とその位置及び対応する自由度）

:SPMATERIAL 半剛接ばね材料特性定義データ

⑧出力制御データ

:PRINT 変位、応力の出力の制御

:REACT 支点反力、節点平衡条件出力の制御

:PRINTSP 半剛接ばねの情報出力の制御

⑨解析終了制御データ

:CYCLE 増分回数等の制御

:CONTROL 解析終了の判定基準

:LOADCON 荷重増分作成の制御

図1 立体梁・柱要素

図2 分布荷重と集中荷重を受ける山形ラーメン

図3 山形ラーメンの合応力分布

2. 4 数値計算手法の概要

ハイブリッド型応力法は、前述したように応力法をベースとしているが、最終的な剛性方程式は、変位型のそれと全く同じ形に変換されている。従って、LAP3Dの基本構造は、変位法を対象とした既往の解析プログラム⁶⁾と全く同様な構造を有しており、異なるのは、要素の概要で述べているように要素剛性マトリックスと分布荷重による荷重ベクトルの算定ルーチンのみである^{1)~4)}。尚、これらの算定に際しては、要素内変位場を設定する必要は全くないが、設計等では、骨組構造物の変形状態を知ることは重要なファクターであり、こうした要求に答えるため、LAP3Dでは、定まった節点変位、合応力分布及び要素特性を用いて離散化誤差のない要素内変位場を算定している⁷⁾。

3. LAP3Dによる解析例

以下では、LAP3Dを用いて行ったいくつかの数値解析例について報告する。尚、解析の詳細については、末尾の参考文献を参照されたい。

3. 1 山形ラーメンの弾塑性崩壊解析⁵⁾

図2に示す荷重を受ける立体骨組の弾塑性崩壊解析を塑性ヒンジ要素を用いて行った。各要素のセグメント分割は21等分割とし、降伏関数は一軸曲げモーメントのみを考慮している。図3に弾性限界時の合応力分布を、又、図4には、変形性状並びに塑性ヒンジ位置を示す。図4より、分布荷重を受ける梁要素の中間部に塑性ヒンジが生じ、その後の荷重に対しては、変位が当該位置で不連続となっていることがわかる。又、応力の再配分によって応力除荷が生じ、ヒンジ位置の移動が起きていることがわかる。このようにヒンジの発生位置が予め特定できない場合の問題に変位型の要素を用いた場合、たとえば文献8)に示されたような特別な操作をほどこさない限り、同様の結果は得られないのは明らかであろう。

3. 2 K型制震ブレース付架構の弾塑性解析⁹⁾

図5に示す実験結果を有する1/2縮小K型制震ブレース付部分架構の弾塑性解析を、塑性ヒンジ要素を用いて行った。総節点数は10、総要素数は13であり、各要素のセグメント分割数は11、又は21分割とした。尚、本構造の復元力特性は、剪断抵抗パネルの弾塑性特性に支配されると予想されるので、梁・柱要素にてモデル化した剪断抵抗パネルの代表セグメントの特性は、実験より得られている合剪断力と変形関係に基いて決定している。図6に単調荷重時の水平力-変形関係を実験結果と共に示す。図中のSTEP番号は、新たに塑性ヒンジが生じた荷重レベルを示している。図7には、架構全体及び剪断抵抗パネルの漸増振幅繰り返し荷重時の荷重と変形の関係を、同じく実験結果と共に示す。本例は、合剪断力-付加塑性たわみという物理的意味をもつ拡張された塑性ヒンジ要素の使用

図4 変形及び塑性ヒンジ位置図

図5 K型制震ブレース付架構（総節点数：10 総要素数：13）

図6 単調荷重時荷重-変形関係

図7 架構全体及び剪断抵抗パネルの荷重-変形関係（左：実験結果 右：解析結果）

例であり、LAP3Dの汎用性を示すものである。

3. 3 半剛接ばねを挿入した片持梁の解析¹⁰⁾

一様分布荷重を受ける片持ち梁の塑性崩壊解析を半剛接ばね挿入塑性ヒンジ要素を用いて行った。モデル化は、半剛接ばね挿入硬化型塑性ヒンジ要素を用いた1要素モデルとし、要素のセグメント分割数は20としている。又、降伏条件は、曲げモーメントのみの関数とし、Zieglerの移動硬化則を採用している。解析ケースは以下の2ケースを設定した。即ち(1)半剛接ばね挿入無し(2)固定端から $l/4$ の位置に剪断ばね(材軸と直交方向のばね)を挿入し、かつ中間部に曲げ回転ばねを挿入の2ケースである。図8に各ケースの梁の変形状と、塑性ヒンジの発生状況を初期の3载荷ステップについて示す。尚、ステップ番号は、荷重増分ステップを意味するが、解析対象の片持ち梁の諸元は各解析ケースで同一であるため、これに対応した载荷レベルは各々同一となっている。又、図中には、ケース2で挿入した半剛接ばねの位置をステップ1の変位分布上で指し示している。これらの結果より、ケース1では、硬化型塑性ヒンジ特性により、外力の増加に伴って、塑性域が伸長して行き、付加塑性変形が支配的になっていることがわかる。一方、ケース2では、ケース1に半剛接ばねが挿入され、その位置に相対変位が付加された変形状が示されていることから、半剛接ばねが有効に機能していることがわかる。

3. 4 自由振動解析と時刻歴応答解析

図8に示すのは、某体育施設の自由振動解析結果として得られた1次振動モード図である。又、図9には、1自由度モデルに縮約された固有周期1.0 sec.モデルにKOBE_NS 1995.01.17の原波を入力した応答結果を示す。

4. おわりに

本報告では、筆者らの開発したハイブリッド型応力法による3次元立体骨組構造物の弾塑性崩壊解析プログラム(LAP3D)の概要を紹介すると共に、いくつかの数値実験により、採用した解析手法の有効性と本解析システムの汎用性を明らかにした。今後の開発計画として、幾何学的非線形問題への拡張と壁や杭を対象とした要素の追加を予定している。

謝 辞

本開発は、日本計算工学会研究分科会(研究項目3:ハイブリッド型応力法一次元要素による固体力学諸問題解析プログラムの開発 主査:近藤一夫)で行われたものであり、広島大学助手 玉井宏章博士をはじめ、河内武(清水建設株)、龍神弘明(前田建設工業株)の各委員には有益なるご助言をいただきました。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 近藤一夫:鋼構造骨組の弾塑性崩壊解析, 培風館, 1991.7
- 2) 稲田, 川端, 近藤, 玉井, 角:ハイブリッド型応力法による鉄筋コンクリート造骨組の弾塑性崩壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 508号, pp.55~62, 1998.6
- 3) 稲田, 近藤, 川端, 河内:コンクリートの軟化特性を考慮したRC梁の弾塑性解析, コンクリート工学年次論文集, 第22巻, 3号, pp.79~84, 2000.6
- 4) 稲田, 近藤, 川端, 角:ハイブリッド型応力法一次元有限要素による軟化特性を考慮したコンクリート部材の弾塑性破壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 533号, pp.91~98, 2000.7
- 5) 稲田, 川端, 近藤, 玉井, 河内, 龍神, 加藤:ハイブリッド型応力法による3次元立体骨組の弾塑性崩壊解析プログラム(LAP96)の開発, 日本計算工学会講演会論文集, 第4巻, 1号, pp.25~28, 1999.5
- 6) 川端:有限要素法の基礎と構造・振動解析, トリケブス, pp.159~309, 1986.3

図8 半剛接ばねを有する梁の解析(1要素モデル)

図8 某体育施設の1次振動モード

図9 時刻歴解析の応答値の例

- 7) 稲田, 川端, 近藤, 角:ハイブリッド型応力法による鉄筋コンクリート骨組の解析(その4:要素内変位場の算定法), 日本建築学会中国支部研究報告, 19巻, pp.169~172, 1995.3
- 8) 上田, 藤久, 為広:径間荷重を受ける骨組構造物の弾塑性解析-塑性選点法の応用, 日本造船学会論文集, 158号, pp.340~347, 1985
- 9) 稲田, 川端, 近藤, 玉井, 龍神, 福永:普通鋼K型制震ブレース付架構の弾塑性解析, 日本建築学会中国支部研究報告, 22巻, pp.205~208, 1999.3
- 10) 稲田, 川端, 近藤:ハイブリッド型応力法による半剛接ばね挿入梁・柱要素の開発について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.275~276, 2000.9

注)本報告の一部は、文献5), 7), 9)~10)に発表している。

[2002年4月16日原稿受理 2002年7月23日採用決定]