

骨組構造物のプッシュオーバー解析に関する研究

松尾 晃

1. 序

耐震性能とは有るか無いかと言う二極的なものではなく、段階的に表現されるべきものである。しかしながら、現行の仕様規定型設計では、地震時の構造物の損傷程度を直接表す最も重要な指標である水平層間変形量を確認することができない。また、仕様規定型設計では耐震性能の定義も曖昧で、施主が設計者に要求する性能、あるいは、管理者が住人や利用者に保証できる性能といったものを明確に示す尺度がない。

このようなことから、日本では平成12年に限界耐力計算に基づく性能規定型設計法が導入された。この方法では想定される数種類の地震動に対して構造物の水平変位の応答レベルを求め、その変位応答レベルの上限を構造物の重要度に合わせて設定することで、建築物に要求する構造性能を明確に定めることが可能となる。この性能規定型設計法では地震応答スペクトルと建物の能力スペクトルを重ね合わせることによって設計を行なうが(図1参照)、この能力スペクトルを導出する際に必要となるのが、能力曲線(Capacity Curve)である。能力曲線は、主として構造全体の水平力と屋上レベルでの水平変位の関係曲線であり、その導出には構造物に対して静的非線形PushOver解析が必要となる。

本研究の目的は、この性能規定型設計法に用いられる能力曲線を、任意の構造物に対して求めるプログラムを作成し、解析ツールとして利用していくことである。構造要素の材料特性によりその構造特性や破壊形式は大きく異なるので、本論では、プログラムの骨格として鉄骨ラーメン構造物を対象としたプログラムを作成し、PushOver解析の結果を大きく左右する外力の分布形状の違いによる影響を調べることを研究内容とした。また、本研究で構築したプログラムをRC構造に適用する際に解決すべき問題点の整理を行なった。

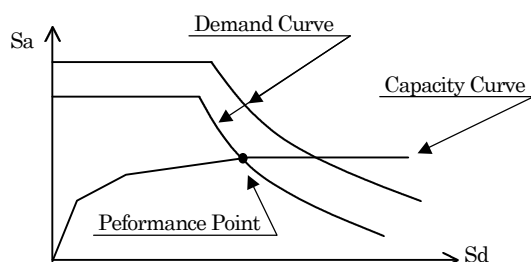


図1 性能設計法における応答値の算定概念

2. 弾塑性プッシュオーバー解析法の概要

PushOver解析を行なう事は、狭義的には構造物が塑性崩壊に至るまでのBaseShearと変位の関係を調べることである。そのための方法として、マトリクス変位法による平面骨組の線形解析と、荷重増分法による弾塑性解析などがある。

マトリクス変位法は、たわみ角法に由来し最も基本理論に忠実な方法で、骨組の節点変位を未知数とする剛性関係式と呼ばれる連立一次方程式を解いて、部材の材端力及び変位を算定しようとするものである。各部材が線形であるという仮定のもと重ね合わせの定理を用いるもので、単調な繰返し計算によって解析を行うことができるので、コンピュータが普及した現在、最も広く普及し利用されている。しかし、このマトリクス変位法が適応できるのは、構造物が線形的な挙動を示す範囲であり、構造物が塑性崩壊に至るまでの弾塑性的な挙動などに関しては、正確な情報が得られない。

そこで、構造要素が塑性域に達してからの解析には、塑性ヒンジの概念を導入した増分法によって複雑な弾塑性解析を行なう。これは、部材の塑性化に合わせて材端の接続条件をピンにすることで、マトリクス変位法で利用する剛性マトリクスを変化させていき、構造全体の弾塑性挙動を線形解析の繰返しによって表現しようとする方法である。

本論ではこの荷重増分法を用いて骨組み構造のPushOver解析を行なうためのプログラムを構築する。

塑性ヒンジの概念に基づく弾塑性増分解析法の本論における基本仮定は以下に示すとおりである。

- 1) 部材は一樣断面であり、曲げ性状はその断面形状と材料特性によって決定される。
- 2) 荷重の作用方向は部材断面の主軸に一致する。
- 3) 部材は完全弾塑性体であり十分な塑性変形能力を有し、塑性崩壊に達する以前に座屈やせん断破壊による不安定な挙動や脆性的な破壊は生じない。
- 4) 部材の降伏条件は図2に示すものに従う。
- 5) 荷重の過程において塑性ヒンジには応力除荷は生じない。実際には除荷が生じ弾性状態に戻ることはあるが、それは考慮しない。
- 6) 降伏は部材の両端にのみ生じるとし、固定荷重による材端以外での曲げ降伏は考慮しない。

3. プログラムの概要と計算フロー

図3に示すような一層ラーメンを例に説明する。

まず、骨組には鉛直荷重による材端力が生じているので、これをマトリクス変位法により求め、その値を初期応力として保管しておく。

次に BaseShear をあらかじめ定めた回数に分割して増分荷重として加えていく。増分荷重のみを作用させた場合の材端力をマトリクス変位法で求め、先に求めた初期応力と合わせて考え、各部材端でモーメントが全塑性モーメントに達していないかを確認する。(図3-a)

どの節点でも全塑性モーメントに達していなければ、同様に、いずれかの部材で全塑性モーメントに達するまで新たに増分荷重による材端力を前回までの材端力に加えていく。そして、ある段階の増分荷重を加えた際に、右柱の柱頭でモーメントが全塑性モーメントに達したとする。(図3-b)

まず、その部材端の結合条件を剛接合から完全なピン結合と置き換える。本来、塑性ヒンジを形成した部材の曲げモーメントは、その部材の全塑性モーメントを維持したままであるが、荷重増分解析法の場合では、前段階までの材端力を加算していくので、その材端の前段階のモーメントを全塑性モーメントに置き換えることで、部材端をピン接合としてもその部材端でのモーメントの値は全塑性モーメントを維持することになる。(図3-c)

さらに、新しい全体剛性マトリクスを組み立て荷重増分をかけ直し応力解析を行う。この際、塑性ヒンジ発生をプログラムに認識させるタイミングは実際にその節点で全塑性モーメントに達する前段階となるので、実際よりも早く塑性ヒンジが発生することになる。これは崩壊機構が変化する恐れがあるので完全に安全側の仮定とは言い難いが、BaseShear の増分値を十分に小さくすることでその誤差を小さくすることができる。(図4参照)

以上のことを骨組が崩壊機構に達したと判断することができるまで繰り返し行い、PushOver 解析を行う。図5に解析フローを示す。

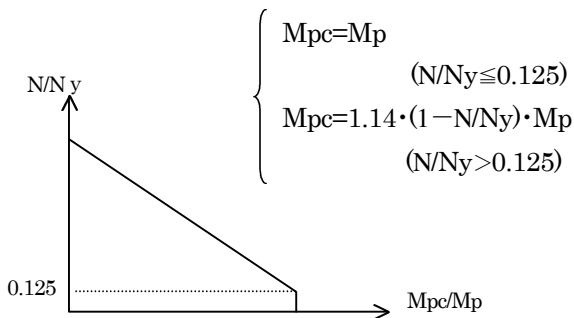


図2 部材断面の降伏条件

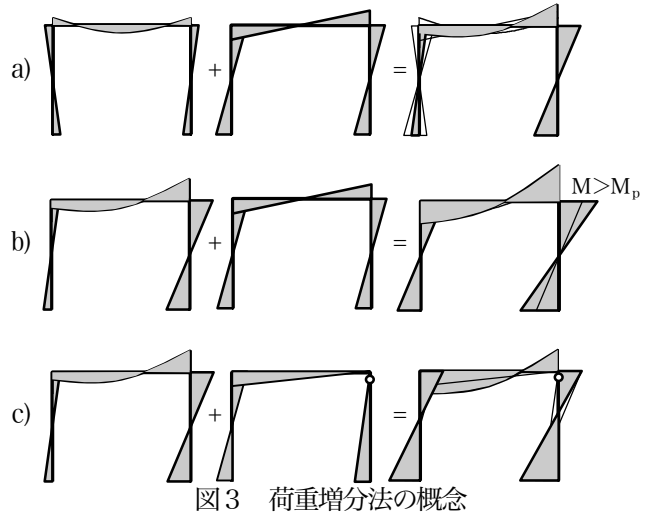


図3 荷重増分法概念

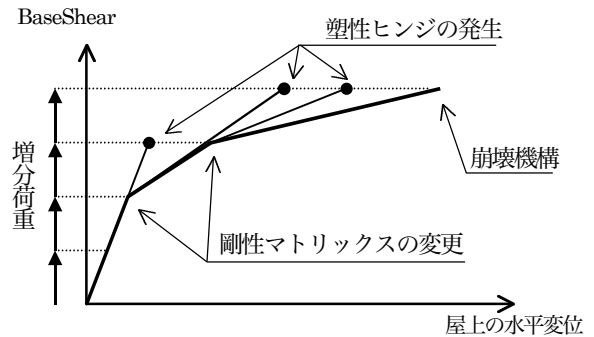


図4 能力曲線

プログラム実行

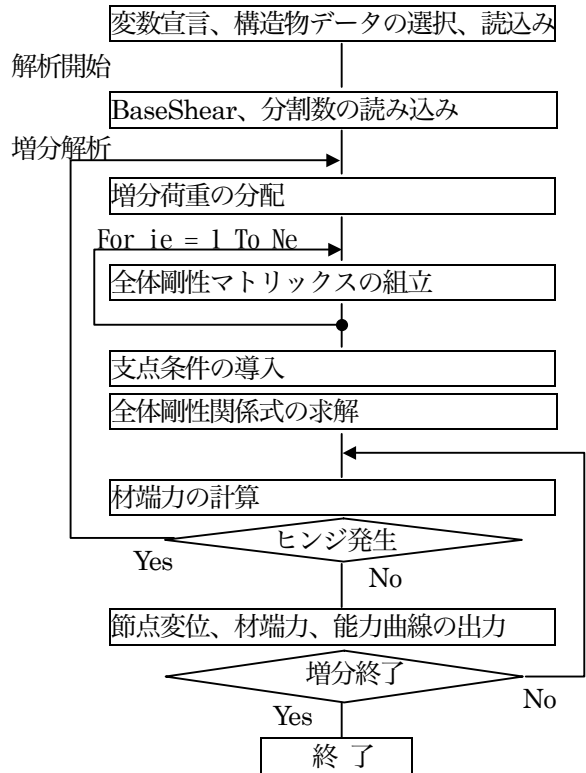


図5 プログラム全体フロー

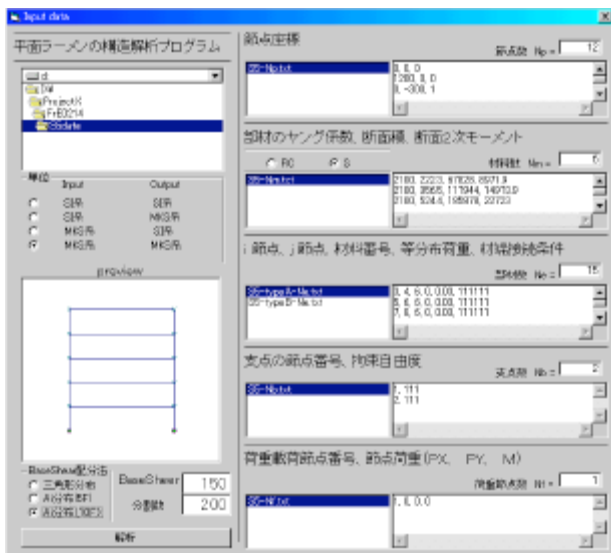


図6 入力画面

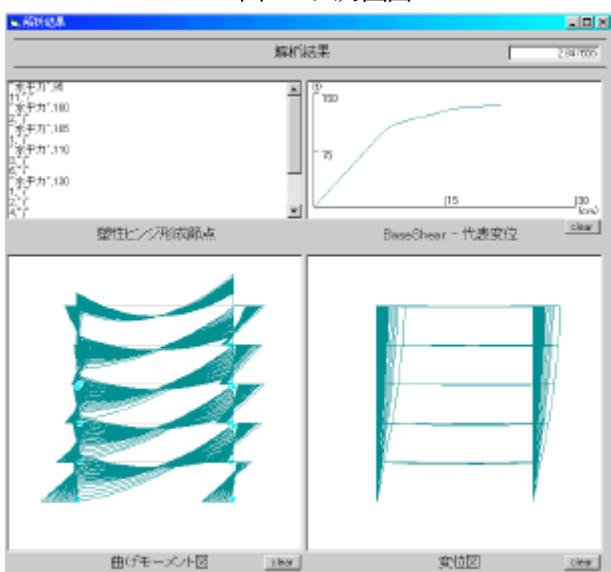


図7 出力画面1

また、解析の実行にあたっては、必要なデータをテキストファイルに用意したうえで、プログラムを実行して図6に示す入力画面から行なう。入力画面では、データの選択、BaseShearの決定等条件を変化させることができる。結果の出力は図7に示す出力画面に、能力曲線、M図、変位図、そして塑性ヒンジ化した節点を示すことができる。

4. 骨組の構造性能に関する解析と考察

PushOver解析により得られる構造物の非線形特性は、仮定する水平外力分布形状や部材特性の分布状況等による影響を受けることが予想される。本章では、本論で構築したプログラムを用いて、上記2点が構造物の非線形特性へ与える影響を調べる。解析モデルは図8に示す5層、10層の1スパンの鉄骨ラーメン構造である。部材特性は1階から最上階まで同一であるtypeAと、下層階と

上層階に異なる部材特性をもつtypeBである。また、水平力の分布形状は層せん断力係数が A_i 分布に従う場合と、逆三角形分布の二種類である。表2に崩壊機構時のヒンジ分布、図9に各モデルの能力曲線、図10に層せん断力-層間変形曲線を示す。BaseShearの分割数は200回、解析の終了条件は、崩壊機構の形成、あるいは層間変形角が3%に達したときである。

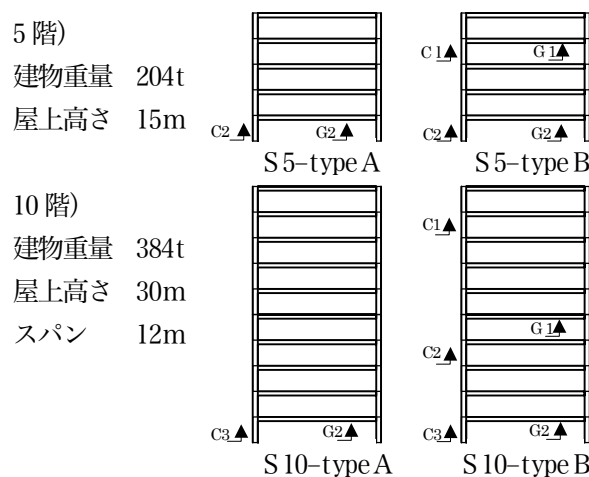


図8 解析モデル

	部材寸法	断面積 (cm ²)	Mp (t・m)
C ₁	H400×400×13×22	222.3	89.7
C ₂	H428×407×20×35	356.5	149.7
C ₃	H458×417×30×50	524.4	227.2
G ₁	H588×300×12×20	185.8	103.4
G ₂	H700×300×13×24	228.8	145.0

表1 部材寸法

	S5-typeA		S5-typeB	
モデル	逆三角形分布		Ai分布	
荷重形式	逆三角形分布	Ai分布	逆三角形分布	Ai分布
崩壊機構	1~3層崩壊	1~3層崩壊	1~4層崩壊	1~4層崩壊
崩壊荷重	139.5	140.3	132.8	131.3
水平変位	25.3	30.1	32.0	39.0

	S10-typeA		S10-typeB	
モデル	逆三角形分布		Ai分布	
荷重形式	逆三角形分布	Ai分布	逆三角形分布	Ai分布
最大層間	3層	3層	5層	6層
崩壊荷重	135.3	135.0	122.9	120.3
水平変位	54.2	57.3	61.8	61.5

表2 限界変形時ヒンジ分布

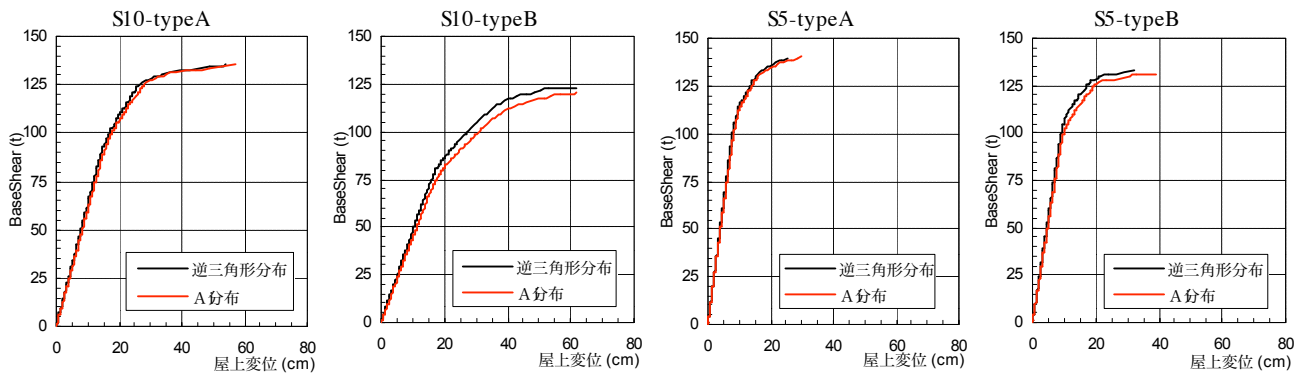


図9 能力曲線

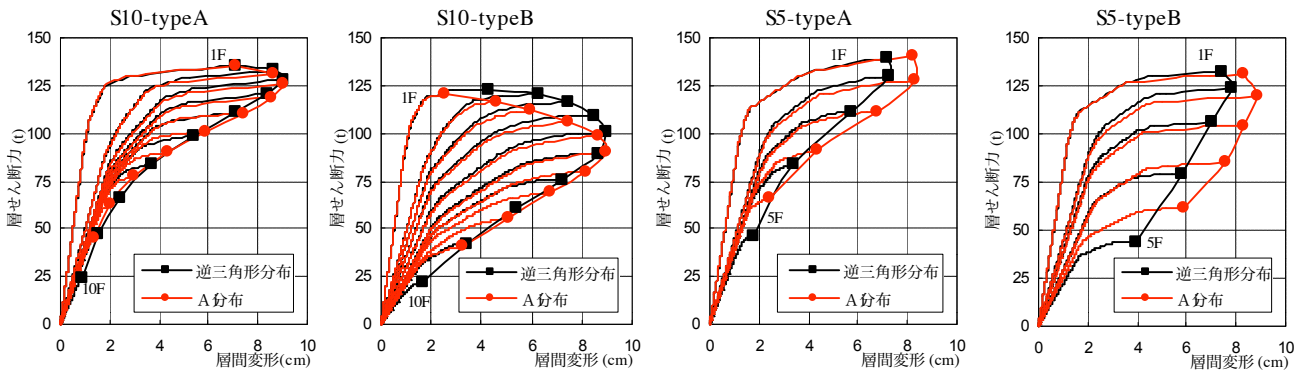


図10 層せん断力-層間変形曲線

図9, 10から分かるように構造物の層せん断力-層間変位関係は上層部ほど外力の分布状況 (A分布と逆三角形) の影響を受け、せん断力・層間変形ともに大きくなった。層間変形は部材特性が均一のモデルは低層に集中し、変化させたものは5層モデルで比較的均等に各層に分布したが、10層モデルではその特性が変化の中層に集中した。

能力曲線は、特に部材特性均一モデルで外力分布の影響をほとんど受けず、耐力が高く変形も比較して小さいことから、その剛性の高さが結果として現れた。

これらのことが工学的にみて妥当な結果であることから、本論で構築したプログラムのPushOver解析に対する信頼性が示唆されたということができると思われる。

5. 結論

1) 適応範囲がまだ狭いものの、一般の鉄骨ラーメンの非線形性状を解析するプログラムの構築がされ、構造物の能力曲線を求めることができた。増分解析を行なう際のアルゴリズムに由来する近似誤差も、荷重増分の分割数を上げることで解決できた。

2) 本研究で構築したプログラムを用いれば、骨組構造物の非線形特性の解析のみならず、構造物における塑性ヒンジの形成過程など崩壊機構に至るまでをリアルタイムに確認することが可能である。

6. 今後の研究課題

本研究は、骨組構造物の非線形PushOver解析を行なうためのプログラムを開発する研究の第一歩に過ぎない。本論で構築したプログラムの適用範囲を拡張し、解析精度及び速度を高めていくために、以下の課題を解決する必要があるため、それらを今後の研究課題としたい。

- 1) より一般的な弾塑性線材要素の導入。本論では、部材要素は一樣断面で完全弾塑性であるとを仮定しており、部材の材端に塑性ヒンジが生じた場合には、該当個所の接続条件を固定端接合からピン接合に置き換える手法で処理している。しかし、この手法ではヒンジ領域の広がりなどの影響を表現することができない。また、柱梁接合部における剛域の影響を考慮しようとした場合、部材数を増やすことになるため剛性マトリックスの次数が大幅に増加され、解析速度が落ちることになる。これらのことから、剛域やヒンジ領域の広がりを包括的に表現できる汎用線材要素の開発が待たれる。
- 2) 様々な材料を用いた部材断面のM-φ相関関係と降伏条件の定式化ルーチンの導入。
- 3) P-Δ効果やせん断破壊などの影響を考慮することによる解析精度の向上。
- 4) 増分解析法としてよく知られているニュートンラフソン法や修正ニュートンラフソン法など、より効率的なアルゴリズムの導入。