

# 簡易弾塑性有限変位解析プログラム 「Lafrinζ」の紹介

岡田 幸児<sup>1)</sup> 玉田 和也<sup>2)</sup>

Lafrinζ (ラフリンゼータ) は、簡易的に弾塑性有限変位平面骨組解析を行うことを目的としたプログラムである。近年、設計断面力解析において弾塑性有限変位解析を積極的に導入する流れがあり、これらの検討に要する時間は無視できないものになりつつある。そのような背景を考慮し、従来の弾性有限変位骨組解析プログラムを用いて、弾塑性有限変位解析を簡便に行えるプログラムを開発した。本文では、本プログラムの概要を紹介する。

## まえがき

最近の大規模橋梁や複雑な構造物の設計では、断面決定後にその妥当性を確認する目的で弾塑性有限変位解析を行うケースが多くなっている。また、構造物を安全側ではなく、なるべく現実に近い形で解析しようとするケースも増えてきている。

一般に、弾塑性有限変位解析は耐荷力を数値実験的にかなり精度よく評価することができると言われていたが、同時に問題も抱えている。たとえば、弾塑性有限変位骨組解析は、解析する構造物を部材方向と断面内にメッシュ状に区切るが、このメッシュの切り方が解析に及ぼす影響は大きく、精度や計算時間を大きく左右する。これらの検討に要する時間は無視できないものであり、設計者に対する負担は大きなものになっている。そのため、実務設計ではより簡易に耐荷力を求めることが望まれている。このような状況において、最近、塑性ヒンジ法の修正案<sup>1)</sup>や局部座屈を考慮した簡易算出法<sup>2)</sup>などが提案されている。

本プログラムで採用した方法は、東京都立大学野上邦栄助教授のご提案の修正 $\zeta$ 法<sup>3)</sup>を使用したものである。この方法は、本州四国連絡橋公団「吊橋主塔設計要領・同解説(1998)」で採用されている有効接線弾性係数法(Ef法)<sup>4)</sup>をヒントにし

て、軸力による剛性低下を考慮する $\zeta$ 関数に加え、曲げ変形による剛性低下を考慮する $\phi$ 関数を導入することにより、幾何学的非線形と材料非線形を考慮した方法である<sup>3), 5), 6), 7)</sup>。

また、近年は耐震設計の分野にも弾塑性解析が導入されつつあり、その前段階の解析や各部材のM- $\phi$ 曲線が必要になってきている。

本プログラムでは、非線形動的解析に用いるデータ作成を配慮し、各部材の塑性判定やM- $\phi$ 曲線の作成が行えるようにしている。

## 1. 簡易弾塑性有限変位解析の概要

修正 $\zeta$ 法は弾性有限変位解析に $\zeta$ 関数と $\phi$ 関数を導入することにより、幾何学的非線形と材料非線形を考慮した方法である。この $\zeta$ 関数は断面全体の材料非線形を包括的に考慮した関数であり、骨組の終局耐力に影響する非線形性を簡易的に取り込むことができる。

## 2. 解析手順

修正 $\zeta$ 法による弾塑性有限変位解析の手順を以下に示す(図-1)。

- ①有限変位解析を行う。
- ②軸応力度から各部材ごとの $\zeta$ 関数を計算する。

1) 開発室 2) 橋梁設計部大阪設計一課係長

- ③ EA = ζ · EA と置き換え、有限変位解析を行う。
- ④ ζ の収束後、作用曲げモーメントより φ 関数を計算する。
- ⑤ EA = ζ · EA, EI = φ · ζ · EI に置き換え収束判定後、有限変位解析を行う。
- ⑥ 次の増分ステップへ進む。

ζ 関数は軸圧縮応力度より求める関数であり、柱の基準耐荷力曲線より求めることができる。道路橋示方書（以下、「JSHB」と示す）<sup>9)</sup> による柱の基準耐荷力曲線を用いた場合、ζ 値は以下の式で与えられる。

$$\zeta = \begin{cases} 1.0 - 0.773 \bar{\sigma} & \bar{\sigma} \leq 0.564 \\ 3.367(1.109 - \bar{\sigma})^2 \bar{\sigma} & 0.564 < \bar{\sigma} \leq 1.0 \\ 0.04 & 1.0 < \bar{\sigma} \end{cases}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_y}$$

この ζ 関数を導入することにより、構造系の軸力による降伏領域の広がりを考慮することができる。また、この基準耐荷力曲線には柱としての残留応力 σ<sub>r</sub> (0.4σ<sub>y</sub>: 圧縮残留応力) と初期変位 v<sub>0</sub> (ℓ/1000, ℓ: 部材長) の影響が考慮されている。また、軸力の他に大きな曲げ変形を受ける構造の場合、ζ 関数による剛性低減のみでは耐荷力が過大評価される傾向にある。これは曲げモーメントを受ける部材の付加的な塑性領域の広がりの影響による曲げ剛性の低下を考慮できないためと考えられる。そこで、部材の曲げ剛性 EI の低減評価を梁-柱の強度相関式の関数により考慮する。

たとえば、JSHB の全塑性強度相関曲線を用いた場合、φ 値は以下のような式で与えられる。

$$\phi = \begin{cases} \frac{1 - \alpha}{1 - \beta} & \alpha > \beta \\ 1.0 & \alpha \leq \beta \end{cases}$$

$$\alpha = \frac{P}{P_y} + \frac{1}{1.18} \frac{M}{M_p} \left| \frac{M}{M_p} \right| \leq 1.0$$

$$\beta = \alpha_0 \left[ \frac{1}{1.18} \frac{M_y}{M_p} + \frac{P}{P_y} \left( 1 - \frac{1}{1.18} \frac{M_y}{M_p} \right) \right]$$

この φ は各節点の曲げモーメントと軸圧縮力による塑性領域の影響を考慮するための非弾性剛性低減パラメータであり、弾性状態で 1、塑性ヒンジ状態で 0 になる関数である。

これら ζ, φ の両関数は、JSHB だけでなく SS RC (アメリカ), ECCS (ヨーロッパ共通標準) などからも導くことができ、本プログラムでも選択が可能となっている<sup>9)</sup>。

### 3. 数値解析例

解析例として、水平荷重 H (H/P<sub>y</sub> = 0.01) と鉛直荷重 P (P/P<sub>y</sub> = 0.8) を受ける H 型断面を有する両端固定の門型ラーメンの計算を行った (図-2)。残留応力として σ<sub>r</sub> = 0.5σ<sub>y</sub>、初期変位として初期回転角 φ (tan φ = 1/400) を考慮する。この門型ラーメンに対して P, H の両荷重を同倍

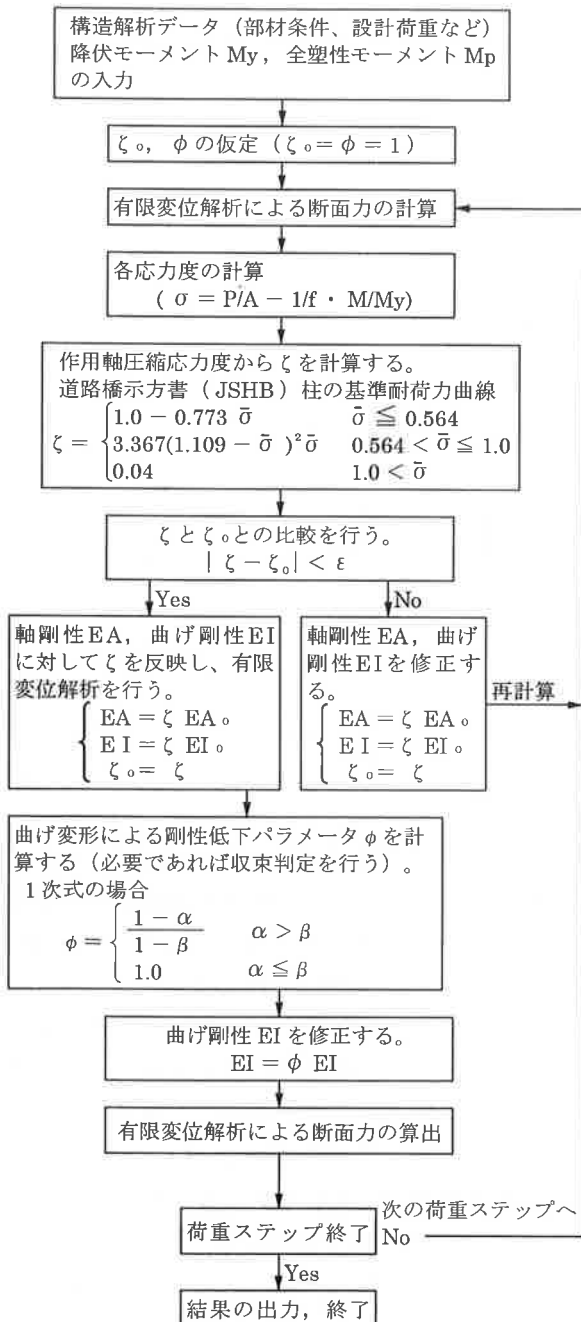
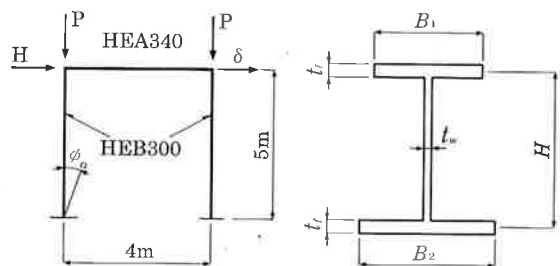


図-1 解析フロー図

率 $\gamma$ で載荷する。ここでは、 $\xi$ 関数にSSRC曲線を用いて計算を行った。

文献3との比較の結果、弾塑性解析と比べて若干低い値が計算されたものの、簡易的な計算方法としてはまずまずの値が得られており、動的な弾塑性解析の前解析としては十分な結果であるといえる(図-3)。また、左柱基部のM- $\phi$ 曲線を図-4に示す。非線形性が現れているのが確認できる。



member	$B_1$	$B_2$	$t_w$	$t_r$	$H$
HEB300	30.0	30.0	1.10	1.90	28.10
HEA340	30.0	30.0	0.95	1.65	31.35

(cm)

$\sigma_y = 23.5 \text{ kN/cm}^2, P_y = 3501.5 \text{ kN}$

図-2 門型ラーメンモデル

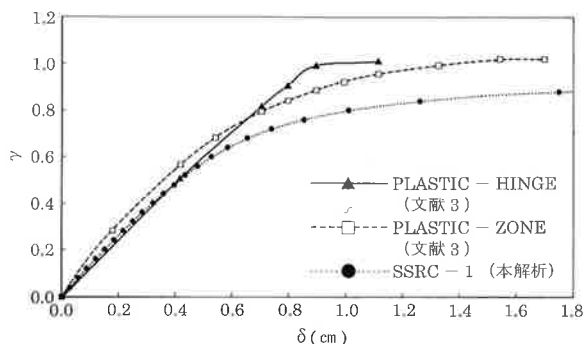


図-3 耐力曲線(左柱基部)

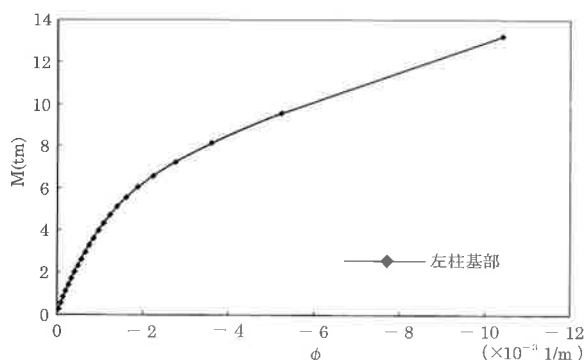


図-4 M- $\phi$ 曲線(左柱基部)

### あとがき

今回開発したプログラムは、幾何学的な非線形解析プログラムに修正 $\xi$ 法を組み込むことで、簡易に弾塑性解析を行うことを実現した。計算結果としては若干、安全側の値をとるものの、簡単に弾塑性解析が行えるものができた。しかしながら、修正 $\xi$ 法は軸力の影響が強い構造系に適していること、耐力曲線により値が変化することなど、計算の際には注意が必要である。

最後に、本プログラムの開発にあたり、指導していただいた東京都立大学 野上邦栄助教授とその他の各関係者の方々に深い感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) Toma,S.and W.F.Chen : Second-order Inelastic Analysis of steel Frames : 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, I -112, 1991.9.
- 2) 崎元達郎 : 骨組構造の簡易終局強度解析法の開発, 土木学会鋼構造新技術小委員会活動報告書, 1993.3.
- 3) 野上邦栄・山本一之・成田信之 : 鋼骨組構造物の簡易耐力算出法の提案, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.83-90,1996.3.
- 4) 本州四国連絡橋公団 : 吊橋主塔設計要領・同解説, 1998.
- 5) 飛鳥馬隆志・松本浩幸・山本一之・野上邦栄 : 骨組構造の簡易耐力算出における曲げ剛性低減パラメータの効果, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, I-A29, 1996.9.
- 6) 野上邦栄 : 鋼ラーメン柱の実用的座屈設計法に関する一提案, 土木学会論文集, No.459 /I-22, pp.159-162, 1993.1.
- 7) 野上邦栄・佐古田圭一・山本一之 : 弾性有限変位解析による骨組構造の簡易耐力曲線算出法の提案, 構造工学における数値解析シンポジウム論文集,第18巻,pp.111-116,1994.7.
- 8) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説, I 共通編・II 鋼橋編, 1996.12.
- 9) 土木学会 : 座屈設計ガイドライン, 技報堂, 1987.