

5. Excel を利用した骨組の限界耐力設計プログラムの開発と検証

02168091 古川 寛
指導教官 藤井 大地 助教授

限界耐力設計 損傷限界 層間変形角
弾塑性解析 安全限界 地震応答層せん断力

1. はじめに

2000 年の建築基準法の改正により、「限界耐力計算」の導入がなされ、従来の仕様規定から性能規定への移行がなされた。限界耐力設計は、すでに汎用の一貫設計ソフトに組み込まれているため、設計者は中身を理解していなくても設計を行うことができる。しかし、仕様設計と異なり、性能設計は構造設計者の判断に任せる部分が多い設計法であるため、中身をよく理解せずにこの設計法を用いることは危険である。また、最近では耐震強度偽装事件が起り、一貫設計ソフトのブラックボックス化に疑問が呈されている。

そこで本研究では、限界耐力設計の中身が理解できる Excel VBA を利用した計算ソフトを開発する。

以下、本論文第 2 章では、限界耐力設計法の概要を示す。第 3 章では、本研究で開発したソフトの概要を示す。第 4 章では、具体的な例題の設計例と比較し、本開発ソフトの有効性を示す。第 5 章では、以上のまとめを述べる。

2. 限界耐力設計¹⁾

図 1 は限界耐力設計のフローを示している。本設計では、まず静的荷重に対する骨組の弾塑性解析を行う必要がある。本研究では、この骨組の弾塑性解析を Excel VBA を利用した解析プログラム²⁾によって行う。

弾塑性解析の水平荷重は、次式の A_i 分布を用いて求める。

$$A_i = 1 + \left(\frac{1}{\sqrt{\alpha_i}} - \alpha_i \right) \frac{2T}{1+3T} \quad (1)$$

ここに、 α_i は最上階から i 階までの重量の和を全重量で割ったもの、 T は建物の設計用 1 次固有周期である。

次に、弾塑性解析により、損傷限界、安全限界時の各層の変位および損傷限界耐力・安全限界耐力を算出する。ここで、損傷限界は、ある鋼材の縁応力が短期許容応力度に達した時、安全限界はある層の層間変形角が指針で決められた層間変形角以上になった時を指す。

次に、損傷限界・安全限界時の各層の変位応答を 1 自由度系に変換し、損傷限界・安全限界時の固有周期を次式によって求める。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} = 2\pi \sqrt{M \frac{\Delta}{Q_B}} \quad (2)$$

ただし、

$$K = \frac{Q_B}{\Delta} \quad M = \frac{\left(\sum_{i=1}^N m_i \cdot \delta_i \right)^2}{\sum_{i=1}^N m_i \cdot \delta_i^2} \quad \Delta = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \cdot \delta_i^2}{\sum_{i=1}^N m_i \cdot \delta_i} \quad (3),(4),(5)$$

ここに、 M は 1 次の等価質量、 K は 1 次の等価剛性、 Δ は代表変位、 Q_B はベースシア、 m_i は最上階から i 階までの各層の質量、 δ_i は各層の変位を表している。

一方、地震外力に関しては、工学基盤面の加速度応答スペクトルに地盤増幅係数 G_s の倍率を掛けて、建物地盤の加速度応答スペクトルを求める。この加速度応答スペクトルと、先に求めた損傷・安全限界時の固有周期から、建物の地震応答加速度を求める。この応答値から、次式により、建物各層の損傷限界時の地震力、安全限界時の地震力を算定する。

$$Qd_{ni} = \sum (m_i \cdot Bd_i \cdot S_0 \cdot Gs \cdot Z) \quad (6)$$

$$Qs_{ni} = \sum (m_i \cdot Bs_i \cdot S_0 \cdot Fh \cdot Gs) \quad (7)$$

ここに、 $Bd_i \cdot Bs_i$ は損傷限界・安全限界時の B_i 分布、 S_0 は工学的基盤の標準スペクトル、 G_s は地盤増幅係数、 Fh は加速度の低減率、 Z は地域係数を表している。

最後に、(6)、(7)式より求められた損傷限界・安全限界時の地震力が、先に求めた建物の耐力を下回るように設計を行う。

以上が限界耐力設計の主な流れである。

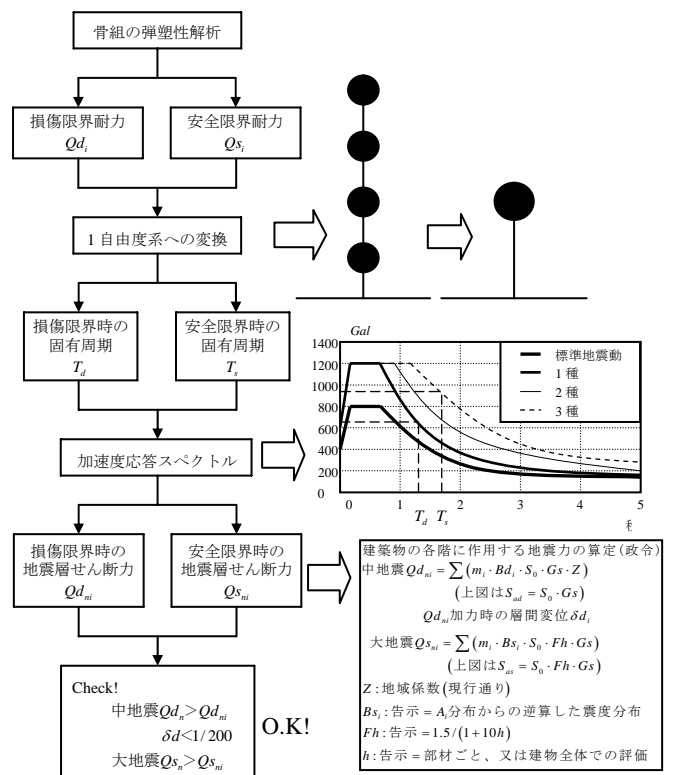


図 1 限界耐力設計のフロー

3. 限界耐力設計プログラム

本研究で開発したプログラムでは、まず必要なデータを Excel のセル上に入力し、弾塑性解析を実行すると、損傷限界・安全限界時の各階の変位と荷重が求まる。また、この時の荷重から損傷限界・安全限界時の耐力（層せん断力）を求めることができる。なお、水平荷重の A_i 分布も各階の質量等を入力すれば、自動計算されるようになっている。また、以上で得られた各階の変位と荷重により 1 自由度系の代表変位 Δ 、固有周期 T_d, T_s を求めることができる。

一方、地震外力は工学的基盤の標準スペクトルに地盤増幅係数の倍率を掛けることによって算出される。本研究ではこの応答スペクトルを簡略法を用いて計算している。

以上から、損傷限界・安全限界時の地震力が算定され、これを先に求めた耐力と比較することにより、安全性のチェックが行われる。本プログラムでは、以上のプロセスをユーザーフォームによる簡単な操作で算出できるようになっている。

4. 限界耐力設計プログラムの検証

ここでは、開発した限界耐力設計プログラムの有効性を検証するため、図 2 に示す 9 層 4 スパンラーメン³⁾の解析モデルにより、他の設計例（参考値）との比較を行う。なお、地盤を第 2 種地盤、設計用 1 次固有周期（鉄骨造は $T=0.03H$ ）を 1.04 秒、振動特性係数を 0.892、標準せん断力係数を 0.2、長期荷重を、基準階を $5,100 \text{ N/m}^2$ 、屋上を 6500 N/m^2 とし、使用部材を、表 1 に記載する鋼材とする。

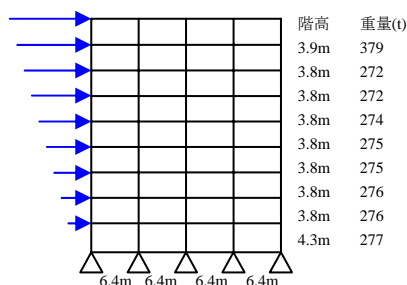


図 2 9 層 4 スパンラーメン

表 1 使用部材

階	柱断面表(BCP490B)	階	梁断面表(SN400B)
7~9	BCP-450×450×19	8~R	H-700×250×12×19
1~6	BCP-500×500×19	5~7	H-700×250×12×22
		2~4	H-700×250×12×25

図 3 は弾塑性解析によって得られた安全限界時の塑性ヒンジをグラフィックス表示したものである。また、図 4 は文献の設計例の塑性ヒンジを示す。これらの図より、ほぼ同様な位置に塑性ヒンジが発生しているが、本解析結果では上層部にも塑性ヒンジが発生していることがわかる。

図 5 は、層間変形角の比較を示す。損傷限界時は本解析値の方が、参考値よりも若干大きくなっており、安全限界時は、本解析値と参考値は近い値になっているが、上層で差が生じていることがわかる。

図 6 は、層せん断力の耐力と地震力を示す。図より、損傷限界耐力・安全限界耐力共に地震応答せん断力を上回っていることがわかる。

また、表 2 には固有周期、代表変位、応答加速度、ベースシア係数の本解析値と参考値の比較を示している。また、固

有周期のカッコ内の値は、骨組振動解析を行った結果を示し（1.42sec）、1 自由度系の換算値と近い値になっている。

以上より、本解析値は、損傷限界・安全限界時共に安全側の結果であることがわかる。これは汎用ソフトと比べて、本プログラムは鉄骨の接合部のモデル化を簡易化しているためと考えられる。

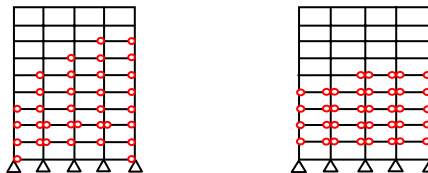


図 3 塑性ヒンジ（計算結果） 図 4 塑性ヒンジ（参考資料）

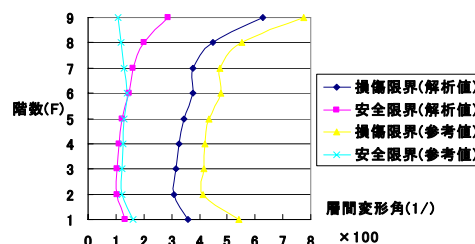


図 5 層間変形角の比較

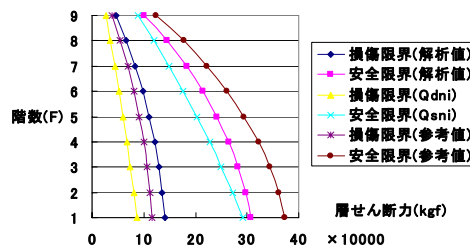


図 6 層せん断力の応答値

表 2 解析結果

	解析値		参考値	
	損傷限界	安全限界	損傷限界	安全限界
固有周期(sec)	1.46(1.42)	1.65	1.39	1.47
代表変位(m)	0.071	0.195	0.049	0.190
応答加速度(m/s^2)	1.31	2.82	0.987	3.50
ベースシア係数	0.109	0.238	0.081	0.290

*0)の値は骨組の固有振動解析による値

5. まとめ

本論文では、Excel のマクロ機能を用いて、上部構造の地震外力分布の設定、弾塑性解析、限界耐力設計に必要な固有周期、損傷限界耐力・安全限界耐力、地震応答値の算定を誰もが容易に計算できるプログラムの開発を行った。また、開発したプログラムの有効性を検証するため、例題と比較した結果、参考値と近い結果を得ることができた。

以上の結果から、本研究で開発したプログラムは、汎用ソフトのような接合部のモデル化等していないため、多少安全側の値が求まるが、本ソフトを用いて、限界耐力設計を行うことが可能である。

参考文献

- 1) 山本泰四郎,改正 建築基準法 [構造の性能規定化]を解く,NPO 法人建築技術支援協会,彰国社,pp64-90,2001.3
- 2) 藤井大地, Excel で解く 3 次元建築構造解析,丸善出版,pp127-152,2005.2
- 3) 佐藤政次,建築物の性能設計と検証法,オーム社,pp60-77,2003.9