

●雇用・能力開発機構理事長賞

木質構造における限界耐力計算手順テキスト

ポリテクカレッジ島根
(中国職業能力開発大学校附属
島根職業能力開発短期大学校)

海江田 勲

1. はじめに

現在、当校で実施している在職者に対する能力開発セミナー（以下「セミナー」）は、事業主からいただいたアンケート調査をもとに、ニーズに合致したコースを計画し実施している。特に企業において、日々変化する先端分野に関する技術的対応は、業務遂行上必要不可欠であることから、担当部署においてはその対応に迫られている。

そこで、能力開発施設として、それらの要望に応えるべく今回取り組んだものが、「木質構造における限界耐力計算手順テキスト」である。これは、建築物の構造計算に新たに加わった「限界耐力計算法」（以下「限耐法」）を用いて建物の構造設計を進めることを想定したものであるが、本計算法は従来の手法と比べ振動解析等の動的解析の知識を必要とし、一般の構造設計者にとっては、難解で理解するのに多くの時間を要する。さらに、鉄骨造や鉄筋コンクリート造に比べ力学的挙動の把握が難しい木造分野においては、限耐法が浸透しているとは言い難い。

これらの状況から、本教材は工務店や中小の設計事務所で木造住宅に携わる方に対して、振動解析等の知識がなくても理解できるように、

- ① 建築基準法の法令フローに沿った形で構成
- ② 実務で計算する基本的な計算手順

を基本に作成し、限耐法を実務処理の面から理解することを目的とする。

2. 限界耐力計算法とは

ここで、限耐法について概要を述べる。限耐法とは、平成12年の建築基準法の改正により、構造安全性の検証法として新たに加わり、

- ① 柱、土台、梁等の最低寸法の規定
- ② 仕口部分での金物使用を義務づけ

等の「仕様規定」から、規定に縛られずに設計目標（表1参照）を満足することに重点を置いた「性能規定」へ転換する手法の1つとされている。特徴として、地震時における建物の壊れる状態（変形の大きさ等）を従来よりも的確に算定しうるので、建物の地震時における全体挙動が把握できる。これは従来の耐力のみの比較だけではなく、地震力による建物の損傷状態（変形）まで数値で確認できるということになる。

表1 構造体に対する性能要求

要求性能		項目	内容
損傷限界	損傷防止	地震動の入力レベル	中度の地震（震度階5強程度）
		構造骨組の要求性能	地震力の作用後に構造安全性の維持に支障がある損傷を生じない
安全限界	人命保護（地震力の作用時に階の崩壊を生じない）	地震動の入力レベル	最大級の地震（震度階7程度）
		構造骨組の要求性能	地震動の作用時に階の崩壊・倒壊を生じない

3. 教材の概要

本教材は、在職者向けのセミナーにおいて、木質構造における限耐法を習得することを前提としている。すなわち、限耐法を実際の業務で活用する前段階として、簡略な表計算プログラムおよび概要説明を含んだマニュアルテキストによって、法令で何が求められ、どのような手順で計算を進めていくのかを確認しながら限耐法の構成・算定すべき項目について理解するものである。ただ、限耐法の中には、許容応力度計算に基づく風圧力や積雪荷重に対する安全性の検証も含まれてはいる。しかし、限耐法は本来、地震対策を主体とした検証法であることから、本テキストでも地震力に特化したものとした。

4. 訓練における使用効果

表計算ソフトを利用して、建物における質量や高さ等の諸条件を入力するだけで、限耐法が算定できる。そのため、地震時における建物の応答変化をシミュレートでき、また、法令フローチャートに沿って計算するので、複雑な計算法である限耐法を、条文との確認や何をどのような手順で行うのかを簡易に理解できる。

5. 教材の内容

5.1 計算フローチャート

初めて限耐法を学ぶ人にとっては、どのような解析方法なのか、どのような手順で計算を行うのかが複雑で難しく、市販されている関連書籍も少ない。そこで、法令フローで何を算出すべきか、という一連の計算の流れを理解することに重点を置き、算出の過程や公式の連動性を記した。図1に、限耐法における計算手順を、法令フローで表す。

5.2 準備計算

各種耐震要素（耐力壁）の復元力特性を建物の架構に応じて加算することにより、各階の復元力特性

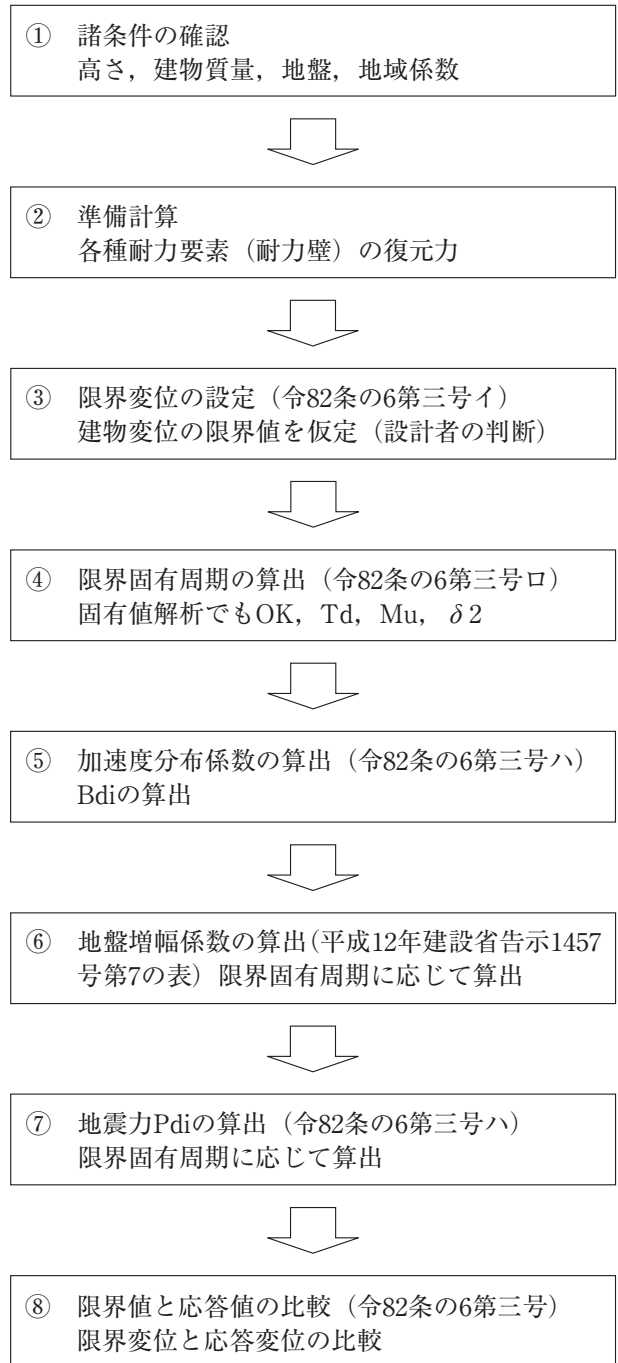


図1 法令フローチャート

を作成する。この架構の復元力特性を設定するに当たっては、各種の耐力要素を有する単位フレームの大変形領域を含んだ静的加力実験の結果をもとに復元力特性を設定し、これを建物の架構に応じて加算することにより算出する。つまり、建物における変形時に保有する耐力を把握する（図2参照）。

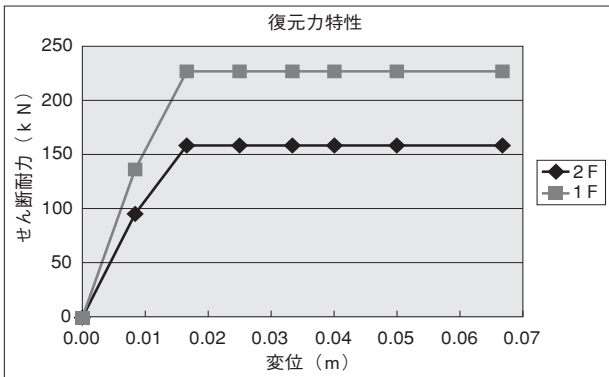


図2 各階における復元力特性

5.3 限界変位の設定

令82条の6第三号イ「各階が、損傷限界耐力に相当する水平力その他のこれに作用する力に耐えている時に当該階に生ずる水平方向の層間変位を計算すること。」より、本計算フローにおいては、損傷限界を一般的な木造軸組では構造体に損傷が生じないと判断できる1/120radに設定した(図3,4参照)。これは1階階高に対する変形の大きさの割合を設計者が総合的に判断することになる。

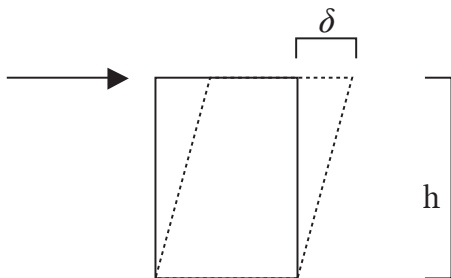


図3 層間変形角の概要

$$\theta = \delta / h = 1 / 120$$

ここで、

θ , δ , h はそれぞれ以下に示す。

θ ; 層間変形角 (rad)

δ ; 層間変位 (mm)

h ; 高さ (mm)

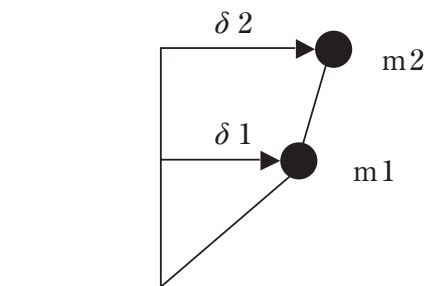


図4 各階の層間変位

ここで、 $\delta 1$, $\delta 2$, $m1$, $m2$ はそれぞれ以下に示す。

$\delta 1$; 1階層間変位 (mm)

$\delta 2$; 2階層間変位 (mm)

$m1$; 1階質量 (kN)

$m2$; 2階質量 (kN)

5.4 1自由度系への縮約

建物の全体の挙動を把握するにはさまざまな方法があるが、建築主事による建築確認を前提とし、かつ構造設計者が建築物の性能を明確に意識することを可能にするという観点から、わかりやすく、かつ第1次近似として全体挙動を明確に算定しうる検証法が有用である。よって、建物モデルを等価な1自由度系に置き換え、復元力特性に基づいて等価1自由度系の層せん断力係数と変位曲線にて評価する(図5参照)。

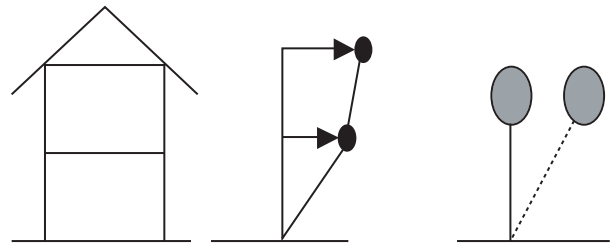


図5 1自由度系の縮約

5.5 限界固有周期の算出

令82条の6第三号ロより、「建築物のいずれかの階において、イで計算した損傷限界変位が生じているときの固有周期を告示の第1の方法によって計算すること。」

$$Td = 2 \cdot \pi \sqrt{Mud \frac{\Delta d}{Qd}} \quad (1.1)$$

ここで、 Mud , Δd , Q はそれぞれ以下に示す。

Mu ; 有効質量 (kN)

Δd ; 代表変位 (m)

Qd ; せん断耐力 (kN) (ベースシャー)

5.6 有効質量Muの算出

有効質量とは、多質点系(多層)の建物を、等価

な1自由度系のモデルに置き換えた時、モデルの質量を有効質量と呼ぶ。このため全質量に比べて有効質量は若干軽くなる。

$$Mu_d = \frac{(\sum m_i \cdot \delta d_i)^2}{\sum m_i \cdot \delta d_i^2} \quad (1.2)$$

ここで、この式において、 m_i および δd_i はそれぞれ次の数値を表すものとする。

m_i ; 第 i 階の質量

δd_i ; 第 i 階に次の式によって計算した建築物の損傷限界耐力に相当する水平力 P_{di} が作用しているときに生ずる第 i 階の基礎からの変位（1階が限界に達したときの2階の変位の算出は、弾塑性時それぞれ方法が異なる）

弾性時の2階変位の算出式

$$\delta_2 = \delta_1 \times \frac{u_2}{u_1} \quad (1.3)$$

塑性時の2階変位の算出式

$$\delta_2 = (\delta_2 - \delta_1) \times \frac{\delta_1'}{\delta_1} \times \frac{k_{e1}'}{k_{ei}'} + \delta_1' \quad (1.4)$$

ここで、 δ_2 、 δ_1 、 δ_1' 、 k_{e1}' 、 k_{ei}' はそれぞれ以下に示す。

δ_2 ; 前ステップ $1/120\text{rad}$ 時の2階変位 (m)

δ_1 ; 前ステップ $1/120\text{rad}$ 時の1階変位 (m)

δ_1' ; $1/60\text{rad}$ 時の1階変位 (m)

k_{e1}' ; $1/60\text{rad}$ 時の1階等価剛性 (kN/m)

k_{ei}' ; $1/120\text{rad}$ 時の2階等価剛性 (kN/m)

5.7 代表変位の算出

各階重量と1次固有モードの各階変位より、代表変位（1自由度系の変位）を算出する。代表変位 δ とは、多質点系（多層）の建物の各階の変位に対し、建物を等価な1自由度系に置き換えた時、質点位置（代表高さ）での変位を代表変位と呼ぶ。

$$\Delta d = \frac{\sum m_i \cdot \delta d_i^2}{\sum m_i \cdot \delta d_i} \quad (1.5)$$

5.8 応答スペクトル

縦軸に応答加速度、横軸に建物の1自由度系に縮約した固有周期をプロットしたもの、つまり1自由度系に縮約した固有周期が求めれば、建物に入力する加速度が求まり、ひいては建物に作用する地震力が算出できる（図6参照）。

以上で、1自由度系に縮約した場合の、建物の固有周期が算出される。

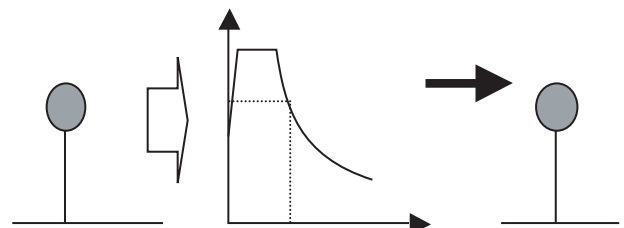


図6 地表面の加速度応答スペクトル概念図

5.9 加速度分布係数の算出

1自由度系に縮約されたものを、再度各階に振り分けるときに、各階に作用する加速度の分布係数 B_{di} を算出する

$$B_{di} = p \cdot q \cdot b_{di} \cdot \frac{M_{ud}}{\sum m_i} \quad (1.6)$$

ここで、 p 、 q 、 b_{di} を以下に示す。

p ; 建築物の階数および損傷限界固有周期に応じて計算した数値

q ; 建築物の全質量に対する有効質量の比率に応じて計算した数値

5.10 地盤増幅係数の算出

工学的基盤に入力された地震の加速度が、表層地盤においてどれくらい増幅され、さらに建物に伝わった時にどれくらい増幅されるか。また、従来地震の加速度は標準せん断力係数という形で表されていたが、限界耐力法では直接地震の加速度を算出する。

5.11 各階に作用する地震力の算出

令82条の6 第三号ハより、「地震により建築物の各階に作用する地震力を、損傷限界固有周期に応じて次の表に掲げる式によって計算した水平力の当該階以上の和として計算すること。」(表2参照)

表2 損傷限界固有周期時の地震力算出式一覧

各階に作用する地震力 (KN)		
Td<0.16	Pdi=	(0.64+6Td) * mi * Bdi * Z * Gs
0.16<=Td<0.64	Pdi=	1.6 * mi * Bdi * Z * Gs
0.64<Td	Pdi=	(1.024 * mi * Bdi * Z * Gs)/Td

5.12 各階応答変位の算出

令82条の6 第三号「(中略) 各階に作用する地震力によって変形した各階の層間変位を次に定めるところによって計算し、当該地震力が、損傷限界耐力を超えないことを確かめることとともに、層間変位の当該各階の高さに対する割合が1/120を超えないことを確かめること。」より、応答変位の算出を行う。

$$S_D = \frac{S_A}{\omega^2} \Rightarrow S_D = \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 S_A \quad (1.7)$$

5.13 判定結果

各階応答変位から各階の層間変形角を算出し、限界変位と比較する。以下に表計算プログラムで算出した計算例の結果を示す(表3参照)。結果より、1階は「応答値」が設定した「限界値」をオーバーし、危険の判定となった。一方、2階部分については若干の耐力的余裕があることから、2階の強度を少し落とし、1階に耐力要素の補強を行い、1階および2階のバランスを取るという選択肢が考えられる。

表3 検証結果

	層間変形角 (rad)	判定
2F	1/ 183	安全
1F	1/ 106	危険

6. 今後の改善点

準備計算時において、単体耐力壁の水平加力実験

データをもとに復元力特性を解析するわけであるが、それらのデータとプログラムとの連動性や、実際に設計段階における強度バランスの取り方など、整備すべき点が多々ある。また、セミナー実施面では、実験装置の充実した応用課程のある大学校との連携や実験データの公開方法など改善の余地があり、ハード・ソフト両面において受講者の満足度を高める必要がある。

7. おわりに

木質構造は、他構造に比べ力の伝達経路が複雑で解析しづらい面や、施工の省力化に伴い加工の機械化が進み、技能の伝承面にも問題を抱えている。

特に、技能の伝承が重要な在来軸組においては顕著に衰退の兆しが見うけられる。そのようななか、伝統構法に光りを当て、従来の規定の縛りがないうえに法の枠組みの中での設計を可能としたこの「限界耐力計算法」の浸透に、少しでも寄与できればと考えている。

【謝辞】

本教材を作成するにあたり、すべてにおいてご指導いただきました、近畿職業能力開発大学校の藤村助教教授に心から感謝申し上げます。

<参考文献>

- 1) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会：伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル，学芸出版社
- 2) 国土交通省建築研究所：改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景，日本建築センター
- 3) 社団法人日本建築構造技術者協会：木造建築構造の設計，オーム社
- 4) 神田順：限界状態設計法の挑戦：建築技術
- 5) 杉山英男編著：木質構造，共立出版
- 6) 有限会社 ストラクチャー：
<http://www.structure.jp/column/column1.html>
- 7) ㈱構造ソフト：
<http://www.kozosoft.co.jp/gijyutu/jisindou.html>