

木構造を考える

～意匠設計者のための木構造 WEB 講座～

第3回 現行耐震基準と壁量規定

P- δ 図 弾性変形 塑性変形 許容応力度設計 保有水平耐力設計 吸収エネルギー
靱性 (じんせい) 接合部 剛性 壁量規定 壁倍率 基準耐力

前回は、現行の耐震設計の安全目標について一般的に述べました。この安全目標は地震の大きさに応じて2つに分け、発生頻度が高い中程度の地震に対しては「損傷を生じさせず、地震が終わったら元に戻るようにする」、また極めて稀に発生する大地震に対しては「損傷や変形は生じても倒壊には至らないようにする」としています。1981年から用いられるようになった耐震設計基準（以後、現耐震基準と呼ぶ）では、この安全目標を前提にして2段階の設計を行うことにしていますが、木構造では果たしてどうなっているのか、現耐震基準の基本原則に触れながらこのことについて少し具体的に考えていきたいと思います。

大地震には「塑性変形」を利用する

まず現耐震基準の基本的な考え方についてみてみます。図1は、ある建物に地震力が水平方向に作用したときの地震力 P と建物の変形 δ (水平変位) の関係を倒壊まで模式的に示したものです。この図の曲線は、建物毎に形が違い、いわば建物の地震抵抗特性を示すものですが、ここでは取りあえず建物の $P-\delta$ 図と呼んでおきます。地震力が大きくなっていくとそれにつれて変形も増加していきますが、変形の特徴から変形を2つに区分して考えることが出来ます。地震力が余り大きくない範囲では変形は小さく、建物に損傷は生じることなく地震が収まると建物は元の状態に戻ります。このとき建物は弾性状態にあると言い、この範囲の変形を「弾性変形」と呼びます。

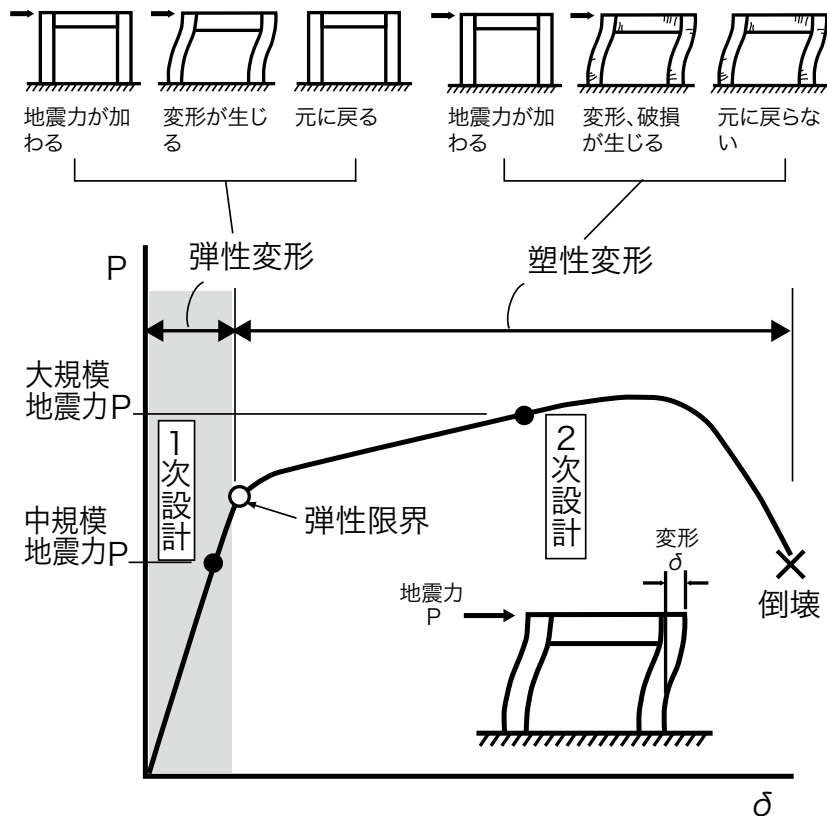


図1 1次設計と2次設計

地震力が更に大きくなると次第に建物のいろいろな部分に損傷が生じ始め、変形が進みやすくなってついには建物の変形限界を超えて倒壊に至ってしまいます。地震が収まっても建物は元の状態には戻りません。このとき建物は塑性状態にあると言い、損傷が生じ始める点から変形限界までの範囲の変形を「塑性変形」と呼びます。弾性変形と塑性変形を区切る P- δ 図上の点を弾性限界と呼んでいます。建物には程度の差はあれこのような性質をかならず有しています。

建物のこのような P- δ 関係を考えて、現耐震基準では、中程度の地震に対してはそれによって生じる変形を弾性変形内に収めて地震が終われば元に戻るようにする、極めて稀に発生する大地震に対しては無理に弾性変形内に収めないで塑性変形を利用して倒壊しにくくする、という基本方針を立てて耐震設計を行います。耐震設計の方法は後に述べるように幾つかありますが、現在最もスタンダードなものは、耐震設計を2段階に分けて行うことにしています。前者の設計には以前から標準的に使われていた「許容応力度設計」、後者の設計には塑性変形を考慮に入れた「保有水平耐力設計」という新たに開発した設計法を用います。これらをそれぞれ1次設計、2次設計と呼ぶこともありますので図ではその名前を使っています。曲線上に記した2つの黒い点は、建物がそれぞれの設計にもとづいてつくられた場合の中地震時、大地震時の応答位置を模式的に示したものです。

■ 吸収エネルギーの大きさに耐震性能を評価する

1981年以前は、RC造やS造の建物は許容応力度設計だけで耐震設計されていました。これは、中地震の時に各部材に生じる応力度が許容応力度以下になるよう作っておけば、許容応力度の最大強度に対する材料安全率の決め方から考えて関東大震災クラスの大地震でも多分強度的には大丈夫だろう、という判断であったと解釈しています。この時点では大地震に対する安全性の検証は、まだ間接的なもので推測の域を出ないものだったと言えるでしょう。このように地震には強度で抵抗するという耐力重視の観点で設計されていたわけですが、1968年十勝沖地震、1978年宮城県沖地震と続いた大地震の建物被害を観察して、むやみに耐力を上げなくても変形をうまくコントロールして「粘り強く」できれば、大地震でも建物の倒壊を防ぐことができるのではないかという考え方が次第に中心になってきました。

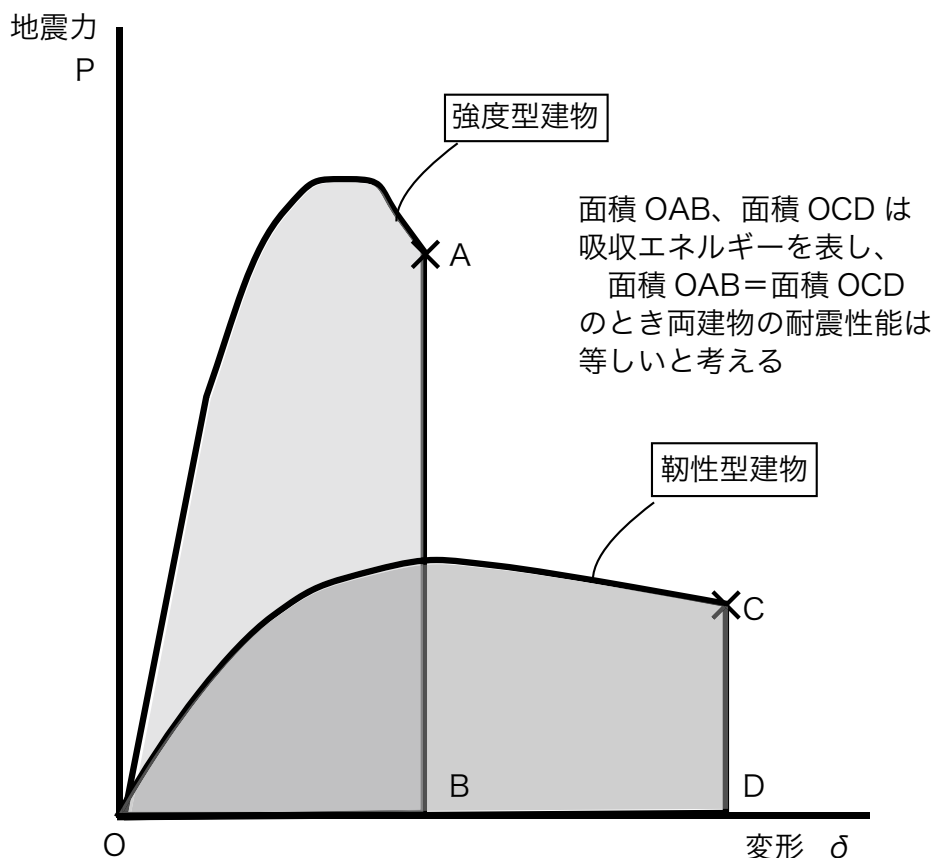


図2 吸収エネルギーと耐震性能

図2は、強度が高い、いわゆる「強度型」建物と、強度はさほど高くないが変形能力が高い、いわゆる「靱性型」建物のP- δ 関係を同時に示した図です。この図の中で、それぞれの建物のP- δ 曲線と倒壊変形を示すラインによって囲まれる、面積OAB、面積OCDは、それぞれの建物が倒壊までに吸収した地震エネルギー量と捉えることが出来ます（縦軸が地震力P、横軸が変形 δ ですから、曲線で囲まれた面積は次元は $P \times \delta$ 、物理的には「吸収エネルギー」になります）。建物の大地震に対する耐震性能をこの吸収エネルギーの大きさと表わせると考えると、面積OAB、面積OCDが等しければ、耐力は異なるがこの2つの建物は同じ耐震性能を持つということになります。この吸収エネルギー量の観点から建物の保有水平耐力を評価する簡便な方法が研究され、それが保有水平耐力設計としてまとまりをみたのです。塑性変形能力＝靱性（じんせい）を手掛かりにしてこのように大地震に対する耐震性能を直接に検証する方法が開発されました。

2段階設計の手法は使用しにくい面もある

建物の保有水平耐力をどう求めるのか、それを何と較べるのか、塑性変形はどのように考慮されているのか、など具体的な内容はこれ以上述べることはしませんが、私は1次設計に許容応力度設計、2次設計に保有水平耐力設計を用いて2段階で耐震設計を行うことについては、工学的には十分意義あることだと思ふ反面、解析手法の一貫性という点ではこの2つの設計法の組み合わせに多少違和感を感じています。

一般的に言って、許容応力度設計は弾性変形範囲内において、

$$\text{応力度} \leq \text{許容応力度} \quad \dots\dots (A)$$

（応力度は地震力の作用によって部材内に生じる単位面積当たりの力；許容応力度は材料強度実験によって材料毎に決められた設計上の上限の応力度）

で耐震性能の検定を行うのに対して、保有水平耐力設計は塑性変形範囲内において、

$$\text{保有水平耐力} \geq \text{必要保有水平耐力} \quad \dots\dots (B)$$

（保有水平耐力は建物が保有する倒壊寸前の耐力；必要保有水平耐力は崩壊するまでに耐えるべき地震時せん断力）

で検定を行います。いずれの方法も力によって検定を行う点は共通ですが、かたや建物の地震時応答の力、かたや建物が保有する耐力、と扱う力の内容に大きな違いがあります（不等号の向き、右辺の内容の違いにも留意して下さい）。また、それぞれどの程度の変形が生じている状態での検定なのかは単純には判断できません。このような点で、耐震設計の全体的な内容を把握するのにいまひとつ確信が持ちにくいのではないかと想像してしまいます。変形、あるいは吸収エネルギーなりを共通の指標として中地震から大地震まで統一的に把握するような方法が安全目標との関連がわかりやすくなり、より明快な判断ができるようになるのではないかと考えています。ともあれ、ここでは靱性を付与することが耐震計画上非常に重要なポイントであること、また、現行のスタンダードな設計において採用されている2段階設計の工学的意味を理解してほしいと思います。

木構造に許容応力度設計を持ち込むことは難しかった

1950年にそれまでの物法を大幅に改定して建築基準法が制定され、耐震設計法としては設計水平震度0.2による許容応力度設計が中心に据えられました。しかし、木構造では、この設計法が見送られてしまいました。木構造は現在でも行政上、特異な扱いを受けていると考えていますが、その背景に関わることなので少しこの事情について説明したいと思います。

当時、建物の多くは木造で作られ、殆どが住宅でした。その建設の担い手は大工、棟梁たちで、長い間の経験が蓄積された伝統的な軸組構法で建設されていました。戦後の復興が急がれたこの時期にあって、数が多く、大工、棟梁たちの経験的な判断、技量に委ねて作っていた木造住宅の耐震設計に構造力学、材料強度学の理解が不可欠な許容応力度設計を持ち込むことは、技術教育の点や建築確認の点から、まず国や行政が躊躇することだったのではないかと想像します。

またこの時点では、許容応力度設計の方法自体が木構造に非常に適用しにくかったことも、もうひとつの事情として指摘しておきたいと思います。この設計法は、内部に生じる最大の応力度を部材毎に求めて、それが使用する材料の許容応力度以下であることを確認する方法です(上記の A 式参照)。原理は非常に明快なものですが、計算モデルを作る必要があるため、部材や接合部の「剛性」(かたさ、あるいは変形しにくさ)のデータが必要不可欠です。特に、部材同士を繋ぐ仕口や継手の種類が多い木構造は、いかに実態に即した接合部モデルを作れるかがポイントになります。RC 造や S 造の接合部は剛節点やピン節点といった節点モデルをそのまま適用できる場合が殆どですが、木構造の場合には剛節点やピン節点の中間的な性質をもつものになり、軸方向バネや回転バネとして考える必要があります。当時の知識と実験データではとても合理的な計算モデルを作ることができるような状況ではなかったと思われる。このような事情から、1950 年には RC 造や S 造と同じ耐震設計法でスタートを切ることはできなかったと思われるが、許容応力度設計に代わるものとして木構造の耐震設計に登場したのは、「壁量規定」と俗称される耐力壁規定でした。

木構造の耐震設計は壁量規定から始まった

壁量規定は、

$$\text{壁倍率} = \text{壁の耐力} / \text{基準耐力} \quad \dots\dots (C)$$

$$\text{建物の存在壁量} \geq \text{必要壁量} \quad \dots\dots (D)$$

の2つの内容を核にして工夫された簡便な方法です。建物に設ける耐力壁の耐力を壁倍率を用いて算出し、その合計が必要壁量を超えているかで耐震性能を検証する方法です。許容応力度設計に代わる設計法として 1950 年基準法に提示されたこの方法は、その簡便さの点でその後の木構造耐震設計のスタンダードな存在になりました。

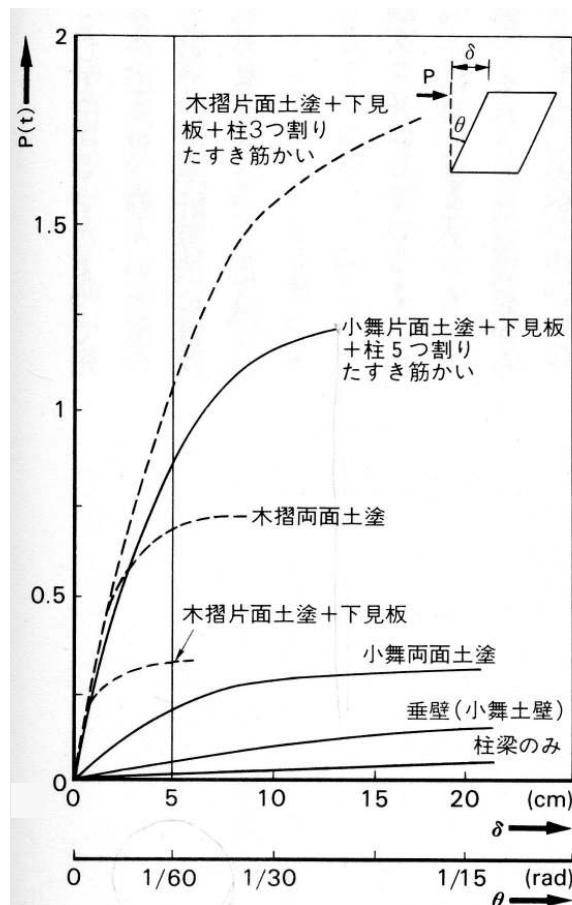


図3 久田俊彦による各種耐力壁の水平加力実験結果 (注1)

図3は、耐震工学の研究者、久田俊彦氏によって1951年に発表された木造住宅の代表的な壁の実大耐力試験結果です(注1)。図1に建物のP- δ 図を示しましたがこれは耐力壁についてのP- δ 図です。久田氏は、当時基準法の草案作りにも関わっていたので、これらの実験結果は1950年の法令に初めて登場した壁量規定のもとになっていると考えられています。柱梁の軸組、垂れ壁(小舞土壁)、土壁、および、筋かい入り土壁など当時よくみられた標準的な壁を、それぞれ実際の建物架構に組み込んで静的な水平方向加力を行った実験です。変形は壁頂変形 δ と変形角 θ (壁頂変形/壁高さ;単位はラジアン)の2種類で示しています。久田氏は変形角1/60ラジアン(壁頂変形5cm)の時の各種耐力壁の耐力を比較して、耐力の大きさを耐力係数として提案しています。この耐力係数の考え方は、現在、法令第46条、告示第1100号に示されている、「倍率」、俗に壁倍率と呼称されている、上記(C)式の内容に受け継がれています。

また、久田氏は、1948年福井地震における木造建物の被害調査から建物が大破、全壊しないために必要な壁の量を「必要壁量」と名付けて、土塗り壁など床面積1平方メートル当りの壁長さ(m)で表しています。この考え方も現行の令46条に掲げられている表の「階の床面積に乗ずる数値(単位 cm/m²)」に受け継がれています。

これらの結果は許容応力度設計に代わる設計法として基準法にまとめられたはずですが、必要壁量の捉え方といい、検証式(D)の形式といい、許容応力度設計よりは保有水平耐力設計の考え方に近いという印象です。

壁倍率の扱いには注意が必要

ある仕様の壁の耐力を、壁の耐力/基準耐力として基準耐力に対する割合で表わすことにしたわけですが、この点に関して注意して欲しいことがあります。壁倍率2の壁とは、その壁の耐力が基準耐力の2倍であることを示すわけですが、この壁の耐力は実際、物理量として何kN(キロニュートン)になるのか、どのくらい変形しているときの耐力なのかは基準耐力の決め方が明示されないとわからないという点です。変形についてみると、久田氏の実験における耐力評価時の変形角は1/60でしたが、1981年の耐震基準改定では耐力を評価する変形角は1/120に変更されています。変形角1/60とは、「壁面仕上げに相当のきれつ、損傷が入った状態であるが、しかし修理にばく大な費用がかかるという、少し手前の状態」と説明されています。先のP- δ 図でいえば塑性変形域に入っている状態と考えられ、久田氏の耐力係数の捉え方は、ここでも1981年に導入された保有水平耐力の考え方に意外と近いのではないかと思います。1981年時の変形角1/120の取り決めは図1の弾性限界に対応する数値として考慮されたのではないかと考えています。このように変形角の大きさは耐力の性格を理解する上で欠かせないものです。2000年の法改正では耐力の評価法そのものが大幅に変わったので、耐力に対する変形角は推定しにくくなりました。このように基準耐力の定義は数回変更されていますので、壁倍率の大きさだけで耐力をみるのではなく、基準耐力の大きさ、評価時変形角の大きさを常にセットで考えるようにしなければいけないと思います。

壁量規定については簡略化を目指す余り、いろいろと無理を重ねている部分が見受けられます。必要壁量という考え方、適用範囲、規定の行政上の扱いなど、考えなければならない点が多くあります。これらに触れないで木構造の耐震設計の理解を深めることは出来ないと思います。次回で少し触れたいと思いますが、今回は最終回ですので、木構造が置かれている現況と、木構造の構造計画と安全目標について私見を述べてまとめたいと考えています。また、連載中、読者から協会の方へ貴重な感想が寄せられているので、寄稿者の了解を得て次回、幾つか紹介したいと思います。今後の参考にしたいと思いますので引き続き感想をお寄せ下さい。文字数枠は900字に拮げています。

(注1) 杉山英男著、「地震と木造住宅」、1995年、丸善(株)刊、より引用