

## 木造多層塔の耐震構造

瀧野 敦夫

生活環境学部 住環境学科 准教授

法隆寺五重塔や法起寺三重塔など奈良をはじめ日本には数多くの木造多層塔が現存しています。それらの多くは三重塔か五重塔に分類されますが、いずれの多層塔も建築用途で考えると平屋建て（つまり1階建て）の建物にあたります。つまり、三重や五重に積み上げたものは全て屋根に相当します。そのため、特に2層目より上部の内部空間は非常に狭い上に、それぞれの層の高さも人が活動するにはやや低い高さのものも多いです（図1はある木造三重塔の部分断面図です）。

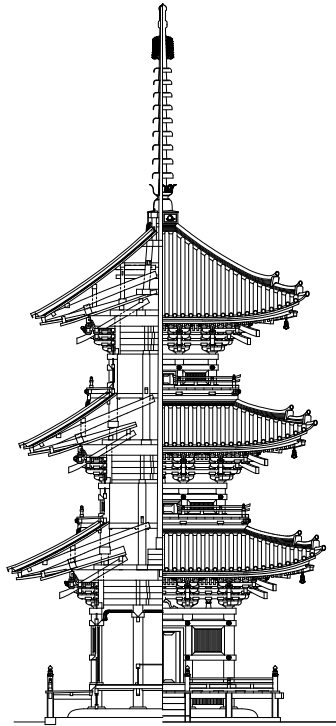


図1 木造三重塔の部分断面図

木造多層塔の構造的特徴は、なんといってもその高さにあります。神社や仏閣、町家など伝統構法による木造の建物と比べると、特に建物の幅や奥行きに対する高さの比が圧倒的に大きく、ビルや高層マンションに近い建物のプロポーションをしています。東日本大震災で東京のビル群がゆっくりと揺れる「長周期地震動」という言葉が注目されましたがこれと同じで木造多層塔は地震の時にゆっくりゆらゆらと揺れるのが特徴です。

地震は大地が揺れることにより各地点が振動する現象ですが、地震によって、あるいは各地点によって表層の地面の揺れ方は様々です。図 2 は過去に実際に起きた地震の観測地震動を用いて求めた加速度応答スペクトルと呼ばれる図です。横軸は建物の周期で、縦軸はその周期の建物に生じる最大加速度の大きさを表しています。まず目につくことは、地震の種類が異なるとグラフの形状が様々であることです。つまり、地震自体のばらつきが大きく、震度 6 弱や震度 7 などの地震といっても揺れ方や大きさは様々であるということです。しかし、どの地震動においても、横軸が 0.2 秒ぐらいから 1 秒ぐらいの間に縦軸のピークがあり、全体的に縦軸の値が大きく、横軸が 1.5 秒を超えるとグラフが非常に小さくなっていることがわかります。建物にはそれぞれ固有の揺れやすい周期（建物の固有周期と呼びます）があり、一般的な低層の建物（住宅や低層の鉄骨造、鉄筋コンクリート造のビルやマンションなど）はこの 0.2 秒から 1 秒ぐらいの間にそれぞれの建物の固有周期があります（建物の高さが低くなればなるほど、また木造、鉄骨造、鉄筋コンクリートの順に、それぞれ固有周期が短くなる傾向にあります）。つまり、低層の建物はだいたいどんな地震が来ても非常によく揺れて、被害が出やすい傾向にある一方で、超高層の建物の固有周期は 1 秒を超えてくるため、地震による建物の揺れが小さくなる傾向にあります。三重塔や五重塔は、木造で、かつ高層の建物になるため一般的に建物の固有周期は長くなり、民家など低層の建物と比べて地震の時に揺れにくいという特徴があり、耐震性という観点から有利になります。ただし、だからといって地震で全く揺れないという訳ではないので、このことが木造多層塔は耐震性が高いという結論にすぐには結びつきませんので注意が必要です。なお、現存する木造三重塔や五重塔がどの程度揺れやすいのか（固有周期）を計測した研究事例は数多く、この固有周期と塔身高さとの関係をグラフにしたのが図 3 ですが、概ね右肩上がりの傾向が見てとれ、建物の高さが高くなるほどゆっくり揺れることがわかります。

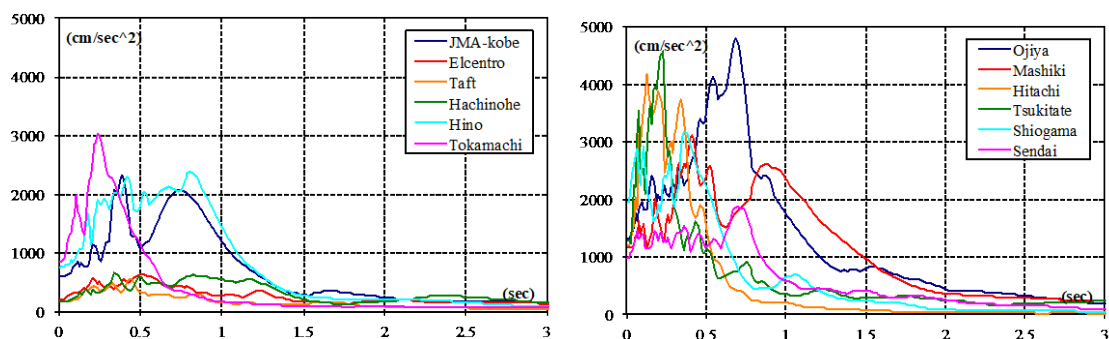


図 2 弾性加速度応答スペクトル一覧（NS 成分・減衰定数 5%）

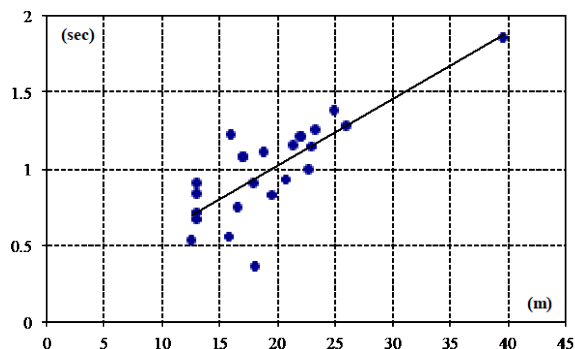


図3 木造多層塔における塔身高さと固有周期の関係

また、木造多層塔は普通金物をほとんど使わずに建てています。木組みと呼ばれる伝統技術で（写真1）、下から順番に様々な加工をした木材を重ね合わせていくことで自立しています。つまり、逆に上から順番に部材を外していくと、原則全ての部材を壊さずにばらすことができます。一番下の柱は足下に設置した石の上に置いただけの構法で、礎石建ち構法と呼ばれます（写真2）。石の上に置いただけで上部の梁とも金物で繋がっていないので、地震で揺れると全ての柱が図4のように傾きます。（普通の建物は土台や梁と金物で繋がっているのでこんなことは起きません。）そうすると建物自身の重さによって傾いた柱が元に戻ろうとする現象が起きます。おきあがりこぼしの様な動きであるこの現象を柱の傾斜復元力特性と呼びます。建物自体が重く、柱が太短いほどこの効果が強くなり、木造多層塔のように階高が低いために柱が太短くなる場合によく現れます。この様子を実験によって確認してみると（図5・図6・写真3）、傾き始めた時に力が生じ始め、その後に変形がどんどん進むと力が減少していることがわかります。縦軸が小さくなるということは、少ない力で押し倒すことができるということで、マイナスの値になると何もしなくても勝手に倒れることとなります。地震が起きると、木造多層塔はこのように柱がカタカタと傾きながらも地震に倒れないように抵抗しているということです。



写真1 新築木造三重塔の建設時の様子



写真2 礎石建ち構法の一例

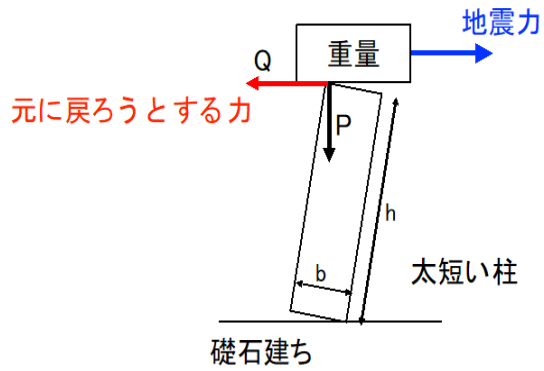


図4 柱の傾斜復元力特性のイメージ図

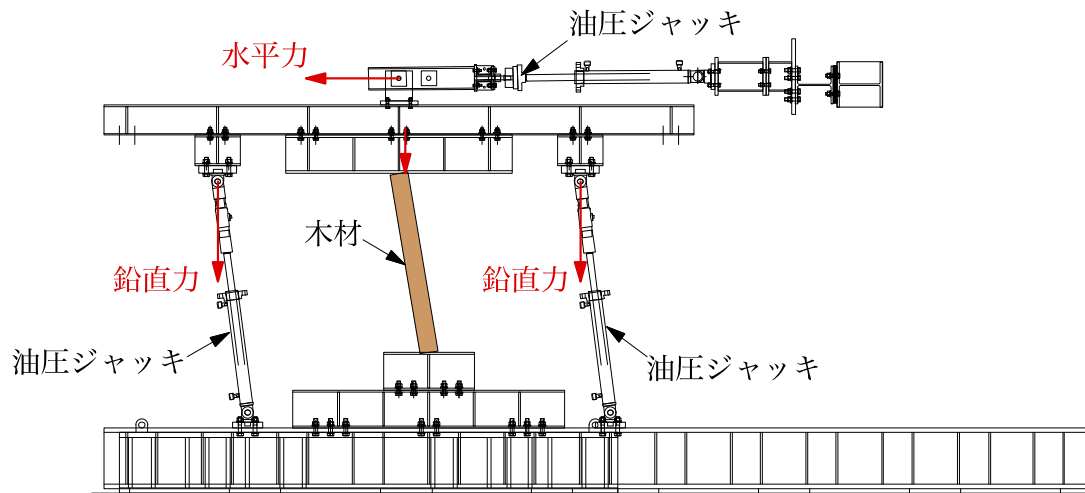


図5 柱の傾斜復元力特性の検証実験

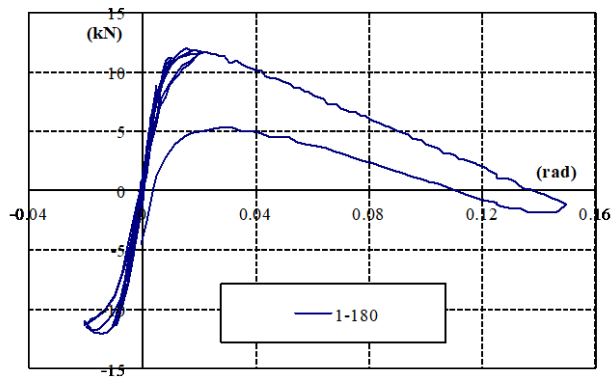


図6 柱の傾斜復元力特性の実験結果の一例（縦軸：水平力／横軸：変形角）

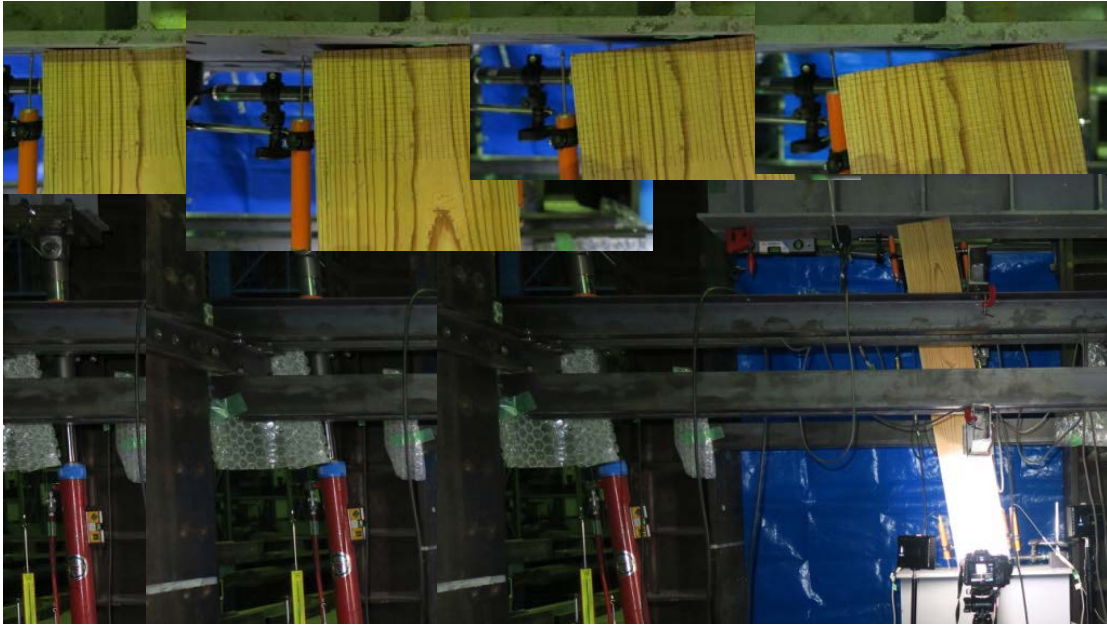


写真3 柱の傾斜復元力特性の検証実験の様子（下段：全体写真／上段：柱頭部分の拡大写真／左から右にいくにつれて変形が進んでいる様子）