

2014年木材学会松山大会
木材強度・木質構造研究会

「木質構造物の動的性能評価とそれを用いた設計法の検討」

プログラム

- 13:30 開会挨拶 森 拓郎 (京都大学)
13:35 釘接合の静的・動的応答特性
平井 卓郎 (北海道大学)
14:35 耐力壁の静的・動的挙動
五十田 博 (京都大学)
15:35-45 休憩
15:45 パネルディスカッション
コーディネータ 森 拓郎
16:25 閉会挨拶 中村 昇 (秋田県立大学)

愛媛大学
城北キャンパス
共通教育棟 3階 (講35)

2014年3月15日(土)
13時30分から16時30分

釘接合の静的・動的応答特性

平井卓郎

北海道大学大学院農学研究院

1. はじめに

木質構造の変形耐力性能は木材接合部の変形耐力性能に大きく支配されるため、主要な木材接合の変形耐力性能に関しては、多くの研究成果が蓄積されている。また、それに基づいて、耐力壁や半剛節ラーメン、トラスなど、各種木質構造要素の変形耐力解析も行われている。一方、木質構造の動的応答に関する研究は、これまでのところ、耐力壁モデルや実大構造物の振動台実験などが多く、そこで観察された動的挙動を個々の接合部の動的挙動と結び付けて理解するためには、まだ基礎資料が不足している。

ここでは、合板-木材釘接合の振動台試験の結果を中心に、木材釘接合の静的・動的応答特性と、釘接合された構造要素の動的応答特性について要点を整理する。

2. 木質構造の構造システムと部材・接合部

木質構造は、部材と接合部で構成される複合構造システムとして捉えられる(図-1)。その静的剛性や固有周波数、減衰定数などの動的特性は、接合部変形の構造変形に占める比(接合部変形比:多くは60~90%程度)によって決まる。このうち、静的剛性と減衰定数は接合部変形比に比例し、固有周波数は接合部変形比の平方根に比例すると考えてよい。また、静的・動的な終局限界は多くの場合、接合部の終局限界で決まる。したがって、木質構造の静的・動的応答を考える際には、木材接合部の静的・動的応答特性を理解する必要がある。

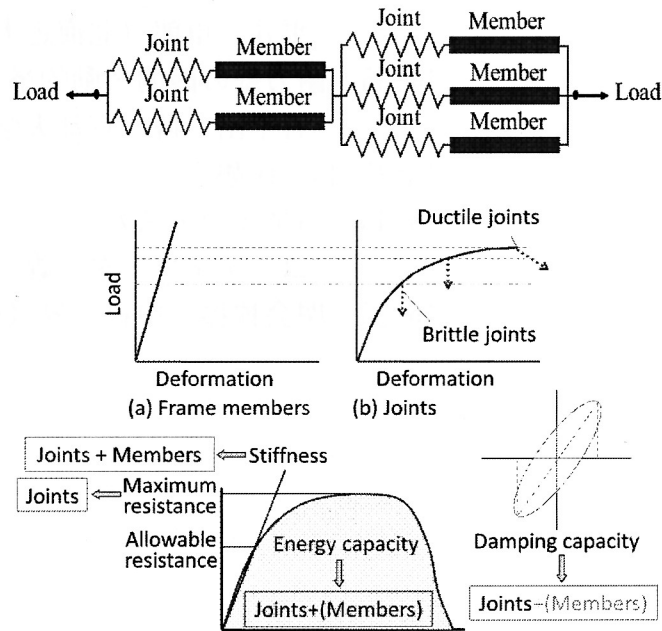


図-1 木質構造の構造システムと部材・接合部

3. 木材釘接合の動的応答特性

3.1 調和波に対する動的応答¹⁾

単一周波数の調和振動における合板-木材釘接合の動的応答特性の要点は次のようにま

とめられる。

釘接合の固有周波数は、静的荷重－すべり曲線から得られる等価割線剛性に対応する。しかし、この固有周波数は釘接合の荷重－すべり関係が低応力レベルから非線形であること、釘接合が静的・動的な繰り返し劣化（剛性低下）²⁻⁴⁾を生じることにより、振動過程において時々刻々と変化する。このため、入力周波数によって、当初共振を生じても固有周波数の減少によって徐々に共振域を離れて応答が鈍化する場合、逆に当初応答が鈍くても、固有周波数減少によって徐々に共振域に近づき、応答が急激に増大する場合などが生じる。

また、動的な破壊は静的破壊モードまたは釘の低サイクル曲げ疲労破壊によって生じ、その発生には周波数依存性がある。

3.2 複合波 (band-limited white noise) に対する動的応答⁵⁾

釘接合が複数の周波数成分からなる複合波によって振動すると、等価割線剛性に対応する周波数成分に対して選択的に共振する。共振周波数成分は、振動過程で連続的に変化する。この場合は、1つの周波数成分との共振を免れても、他の周波数成分と共振するようになるため、複合波の周波数分布域によっては、釘接合に長時間または繰り返し振動が加わると、入力加速度が損傷限界程度でも、接合部が終局破壊を生じる可能性がある。この挙動は、調和波に対する動的応答挙動の重ね合わせによって、推定することができる。

3.3 合板釘打ち耐力壁の動的応答

合板釘打ち耐力壁の動的応答特性は、静的応答特性と同様に、釘接合単体の動的応答特性から推定することができる。ただし、釘打ち耐力壁では、釘の位置によって入力レベルが異なるので、耐力壁全体としての振動特性（剛性）とコーナー部の釘の損傷・破壊挙動とは比例しない。

3.4 調和波に対する減衰特性

釘接合の減衰特性は、静的履歴と動的履歴によって特徴的な違いがあり、入力レベルが上がると静的加力では減衰定数が低下するのに対し、動的加力では減衰定数が増大する。また、動的減衰では破壊モードの違いを反映して減衰定数が周波数依存性を持つ。

3.5 木質構造における摩擦と摩擦減衰

木材接合部で生じる摩擦は剛塑性型の履歴挙動を示すため、大きな減衰容量が期待できる⁶⁻⁹⁾。現状では、定量的な評価が行われていないが、今後の検討課題の1つである。また、釘接合やボルト接合における2次付加耐力(ロープ効果)の主要因子も摩擦抵抗である^{10,11)}。

4. さいごに

以上のように、木質構造の動的応答特性は接合部の動的応答特性から推定可能であるが、振動履歴による応答特性の変化や、動的破壊モード、減衰特性の周波数依存性など、現状では評価法の示されていない多くの課題が残されている。実用的に重要な課題としては、振動履歴による固有周波数の変化をどのように設計に反映させて行くか、釘や木ねじの低サイクル曲げ疲労破壊に対しどのような設計方針を定めるか、振動履歴の影響をどのように考慮して行くかなどであろう。

参考文献

- 1) Hirai, T., Uematsu, T., Sasaki, Y., Toda, M., Wanyama, O.G., Sawata, K.: Dynamic Responsive Characteristics of Nailed Plywood-Timber Joints under Harmonic Vibrations, *J Wood Science*, 58(5), 408-416, 2012.
- 2) 若島嘉朗, 平井卓郎: 繰り返し負荷を受ける木材と合板の釘接合部の履歴特性 (第1報) 静的正負繰り返し負荷試験, *木材学会誌*, 39(11), 1259-1266, 1993.
- 3) 若島嘉朗, 平井卓郎: 繰り返し負荷を受ける木材と合板の釘接合部の履歴特性 (第2報) 弾性床上の梁理論による数値解析, *木材学会誌*, 39(12), 1377-1385, 1993.
- 4) 若島嘉朗, 平井卓郎: 繰り返し負荷を受ける木材と合板の釘接合部の履歴特性 (第3報) 基礎定数の再検討, *木材学会誌*, 43(5), 417-426, 1997.
- 5) Hirai, T., Uematsu, T., Sasaki, Y., Toda, M.: Dynamic responses of nailed plywood- timber joints under a band-limited white-noise wave. *J Wood Science*. 59(6), 477-483, 2013.
- 6) 孟慶軍, 平井卓郎, 澤田圭, 佐々木義久, 小泉章夫, 植松武是: 枠組壁工法における壁-床接合部のせん断耐力に及ぼす摩擦力の影響, *木材学会誌*, 56(1), 48-54, 2010.
- 7) Awaludin, A., Sasaki, Y., Oikawa, A., Hirai, T., Hayashikawa, T.: Friction damping of pre-stressed timber joints, The 10th World Conference on Timber Engineering, June 2-3, 2008, Miyazaki, Japan.
- 8) Hirai, T., Meng, Q., Sawata, K., Koizumi, A., Sasaki, Y., Uematsu, T.: Some Aspects of Frictional Resistance in Timber Construction, The 10th World Conference on Timber Engineering, June 2-3, 2008, Miyazaki, Japan.
- 9) Hirai, T., Sawata, K., Awaludin, A., Sasaki, Y., Uematsu, T.: Dynamic response of wall-floor joints of wooden light frame constructions under forced harmonic vibrations, *J Wood Science*, 58(2), 128-134, 2012.
- 10) 平井卓郎: 鋼板ウェブを持つ木材接合部の荷重-すべり性能, *北大農演研報*, 47(1), 215-248, 1990.
- 11) Hirai, T., Wakashima, Y.: Lateral Resistance and Fracture Modes of Nailed Timber Joints III. Numerical analyses of maximum lateral resistance of nailed timber-plywood joints. *Mokuzai Gakkaishi*, 42(12), 1996.

耐力壁の静的・動的挙動

京大大学生存圏研究所

教授 五十田博

1. はじめに

担当者からいただいたお題は「耐力壁の静的・動的挙動」である。このお題には静的挙動と動的挙動の違いを比べること、耐力壁の挙動について概説すること、の両者が含まれるように思われる。ここではその辺の仕切りをあまり気にせずに、その両者について雑多に取り留めなく思いつくまま書くことにしたい。また、耐力壁を主たる構成要素とし、本来求めたい建物の静的・動的挙動までを述べさせていただく。ただし、文章中では動的挙動として扱われる振動モードや固有周期の違いによる入力の変化などには触れていない。ここでの対象は、建築基準法施行令第46条第4項に示される壁、建告56年第1100号に示される壁、住宅の品質確保の促進等に関する法律で用いられる準耐力壁を含む壁、耐震診断等で用いられる仕上げや外壁、粘性体、粘弾性体などを抵抗要素とする制振壁、なども含んで議論している。

2. 耐力壁の種類と静的・動的挙動

耐力壁は大きく、土壁、筋かい、面材によるもの、などに分けられる。土壁は壁厚により面外座屈を生じる場合とせん断破壊する場合に分けられ、筋かいは筋かいの断面により引張筋かい、圧縮筋かいとに分けられる。面材は面材の種類と釘の組み合わせ、面材の貼り方、つまり、四周打ち、川の字打ちの違い、耐力壁仕様、準耐力壁仕様などにより、釘や木ねじ接合部が破壊する場合と面材自身がせん断破壊する場合、などに分けられる。厚い土壁や筋かいは変形性能が一般に乏しく変形角 $1/45\text{rad}$ を超えたあたりで座屈を生じるとされ、面材壁の変形性能は、釘やビスなどと面材のせん断性能に依存するが、釘打ち構造用合板などは $1/30\text{rad}$ を超えたあたりで最大荷重を迎える。

これら壁に対する静的挙動と動的挙動の比較研究はこれまでいくつか実施されている。一般論としては、動的実験では剛性、降伏点、さらには、最大荷重が上昇し、変形性能が低下する。面材壁などでは繰り返しをすると速度の影響で変形能力の低下が大きい。ただし、面材耐力壁の場合、層間変形に対する速度が 100cm/sec としても接合部に作用する速度は 1cm/sec 程度まで低下し、その影響は設計上無視できると考えられている。筋かいに関しての層間変形と接合部端部の変形を含む筋かいの変形との関係は幾何学的に求まり、1Pの壁でそれは $1/7$ 程度であり、面材に比べると大きい。しかし、筋かい耐力壁に対して静的と動的実験の結果を比較しても、その差はほとんど見られない。なお、静的と動的の挙動差が大きく、かつ明確に異なるのは最近開発が盛んにおこなわれている制振壁に用いられる制振材料である。これまで私が関係している高減衰ゴムは耐力壁の評価を目的として比較的速度に対して安定した性能を有しているが、本来、制振材料は、大きな速度依存性を有し、速度が速くなると性能が向上する。木質構造以外の構造では、粘弾性体、粘性体問わず、速度依存性による性能向上を良い性質として評価することが多い。

3. 耐力壁周辺接合部の設計法との関係

耐力壁周辺接合部は、耐力壁が最大荷重を迎えるまで最大荷重に達しないように設計、つまり保有耐力接合とする破壊モードが基本である。釘や木ねじを用いた耐力壁や接合部であれば、動的载荷によって壁の耐力が上昇したとしても接合部も同様に耐力が上昇する。作用速度は、一般に柱-横架材接合部の速度が最も速いと考えられ、その結果として、速度効果による破壊モードの変化は生じない。また、材料の個体誤差によって強度特性のばらつきも生じると考えられるが、同じ柱、横架材に面材、接合部ともに接合されているため、個体誤差によっても破壊モードの変化はないと考えられる。これらの影響よりは、①設計に用いている計算法の精度、②垂れ壁・腰壁の効果、③設計に考慮していない外装材などの耐力の効果、④耐力壁の評価法と接合部の評価法の違いによる影響、などが大きい。例えば、④では耐力壁が平均値の下限値を評価値としているのに対して、接合部は下側5%下限値を評価値としている。よって、①の計算法の精度が極めて高く、変動係数が極めて小さい場合には破壊モードは担保されることになる。また、①で安全率を見込んでいるのであれば、③でいわゆる非構造部材の影響により耐力が上昇したとしても、破壊モードを変化させることはない。つまり、①から④は密接に関係しており、どれか一つを高精度としたとしても破壊モードが担保される方向に向かうかどうかは不明である。

4. 建物の静的・動的挙動と耐震安全性

耐震設計において層の性能評価は、壁の評価値の累加、壁量計算では壁倍率×壁長さの累加でなされる。建築基準法では耐力壁のみで設計をするが、木造住宅は非構造部材の水平耐力への寄与が大きい。基準法の変遷の歴史の中では建物全体のせん断力に対し20%とか1/3とかという数値が非構造部材にあてられてきた。また、木造住宅のようなせん断系の建物の層の荷重変形関係は、非構造部材もすべて含む壁のその累加により求められる。しかし、これまでの研究によれば、単体壁の累加により求めた層の荷重変形関係と実大建物の静的・動的実験を比較すると、1/60rad程度の範囲までは累加により層の荷重変形を追跡可能であるが、最大耐力に関しては累加が20%ほど小さな値になるとされている。ついで、限界変形に注目すると、耐力壁の性能評価試験では変形を最大荷重の80%の荷重に低下するまでか、変形角が1/15radまで、としている。一般的な壁は1/20rad程度で最大荷重の80%に達するものが多い。一方、実際の倒壊限界を実験により求めた研究などでは、倒壊限界は設計値や積載荷重の多寡により厳密には異なるが1/3-1/5rad程度とされている。つまり、前述の1/20radに対して実際の倒壊には3~5倍程度の余裕がある。このような余裕があるにも関わらずなぜ木造住宅の耐震性能が低いとされるか？それは実際の地震動が基準法の想定よりも大きいこと、さらに壁量計算で前提としている実際の重量の見込みがあまく、軽く見積もりすぎており、実際には想定よりも大きく地震動が入力されるからである。

5. おわりに

耐力壁の静的・動的挙動にはじまり、接合部を含む耐力壁全体の性能を担保するための保有耐力接合を含め、建物の耐震性能について極めて簡単に述べた。耐力壁の動的挙動を

解明することはもとより、耐力壁の周辺接合部に生じる力をはりの断面や垂れ壁、腰壁の影響を含め解くことはいわば「理論」であり、安全な建物をつくるのは「技術」である。学問としての「理論」の追及も必要であるし、工学としての「技術」の構築も必要であろう。

大正15年(1926年)佐野利器は「諸君、建築技術は地震現象を説明する学問ではない。現象理法が明でも不明でも、これに対抗するのは実技である。建築界には、百年もの間河の清きを待つ余裕はない」と述べた。さて、それから百年ほどを経た現在、現象理法は進歩したであろうか？安全性を担保する建築技術はどうだろうか？静的挙動と動的挙動をキーワードに木材強度・木質構造研究会で考えてみたい。