



真崎雄一
Yuichi Masaki
(有) MASA建築構造設計室



涌井栄治
Eiji Wakui
(有) MASA建築構造設計室

開発案件における法的障害 木造住宅用方杖付き間柱の開発にあたり

The legal obstacle on the this projects
- In developing the stud system with four knee braces for wooden house

Summary

On the design method of wooden post and beam houses in Japan, some characteristics of timber structure are ignored. It is the reason why the requirement design is not appropriate evolutions but it is rough structural safely. We have developed the new stud system with four knee braces, and compare this performance with plywood and cross braces which are commonly used.

Through the investigation about skeleton curves based on full scale tests, the strength of this development system is lower than that of cross braces until a story drift 1/50 rad., but higher than that between 1/50 ~ 1/15 rad. Moreover, the test results show that this development system does not have serious damage over 1/15 rad. However, the evaluation results based on wall force ratio cannot be shown above performance, because the ratio is

calculated 3.4 times for this system, in contrast 4.0 times for cross braces.

The seismic response analysis for two types of three-story apartment building has conducted; one is composed by plywood and cross braces, the other is composed by this development systems. These types of building have equivalent seismic performance based on current building standard law, nevertheless the analysis results shows that the building with this development system decreases the response of story drift against another building under the ground motion which is graded Level 1 and Level 2. Consequently, the evaluation by wall force ratio differs from that by seismic analysis.

In order to better design, the legal system of wooden structures should be shown real performances of wooden engineering.

1. 序

法律は公布された時点から陳腐化する宿命にある。特に、日進月歩で進展する技術分野においては、なおさらその感が強い。例えば自動車の開発に当っては、安全検証はあっても厳格な規定のある法律は存在しない。一方、建築に関しては、中途半端に厳格な規定のある法律が施行されている。以下、木造開発案件の評価を通して、実際と建築基準法等関連規定との矛盾について考えてみる。

2. 建物の理想的性状

建物は地盤の揺れの周期と建物の固有周期が一致すると共振状態となり、振動エネルギーが非常に大きくなってしまう。このような共振状態となれば倒壊は免れたとしても、建物には大きな残留変形が残り、資産価値は低下し結果的に取壊しの運命になってしまうであろう。そうならないために、建物には振動エネルギーを吸収しつつ残留変形も抑制できる性能があることが理想的である。

3. 現状の木造建物の性能

では、現状の木造建物の性能はどうであろうか。現状の代表的耐震要素である筋かい及び構造用合板はどのような性質をもっているのか、前述に照らし合わせて考えてみる。まず構造用合板であるが、既往の実験によると構造用合板の性状は、合板が有している性状が現れる前に、合板を固定する周辺の梁・柱と接合するために打たれる釘の塑性変形によるエネルギー吸収が支配的である。よって、その性状は周辺に打たれる釘の本数に大きく影響を受ける。結果として、面材に構造用合板を用いたフレームには、履歴エ

ネルギーによる振動エネルギーの吸収はあるが復元力は存在しないので、地震終了後には元に戻らないことになる。

次に、木製の筋かいはどうであろうか。筋かいの場合、引張状態と圧縮状態で異なった性状を示す。引張り筋かいでは、構造用合板と同様に、筋かいの両端部に存在する金物一木材を接合している釘が塑性変形しエネルギー吸収をする。また、圧縮筋かいの場合には、接合部での木材のめり込み変形によりエネルギー吸収が行われるとともに、筋かい部材自体は弾性性状を示す面外座屈をする。層間変形角1/45程度において最大耐力を発揮するが、さらに変形が進み層間変形角1/30程度になると座屈破壊を生じ急激に耐力を失ってしまう。

これらの事から、木造建物の面材に構造用合板と筋かいを併用する現在の一般的構法は、復元力のあるエネルギー吸収が行われているので、ある程度であるが理想的な組み合わせとすることができる。しかし残念ながら、実際の建物において圧縮筋かいは間柱や面材による拘束により弾性座屈を抑えられてしまうので、最大耐力は上昇するものの筋かい自体が脆性破壊を起こしてしまう。

4. 伝統的建物の性能と制震ダンパー

日本の伝統的建物には現代構法の筋かいは存在しないが、主要部材の曲げ耐力による復元力が存在する。つまり、1、2階を貫通する太い通し柱や大黒柱と梁や貫などの横架材との接合形式が、建物全体を半剛接合のラーメン架構としていのである。よって、伝統的建物は木材と木材の接合部でのめり込みや摩擦によるエネルギー吸収があり復元力もあるので、理想的な建物であると言える。

さらに改良するとすれば、建物重量を長期に支えている柱に限界以上の地震や台風の外力が作用すると建物倒壊に繋がる危険性が高くなってしまいますので、この状態を避けられればなおさらよい。この点において、損傷部材を設け、さらに、その損傷部材は振動エネルギーの増大を抑制する機能をもつ「制振ダンパー」とすることが有効である。



図1 方杖付き間柱ダンパー写真
Fig.1

5. 方杖付き間柱ダンパーの開発

本開発案は、通常は外壁・内壁の仕上げ材を固定するだけの役目しか果たさない間柱に、方杖を設けることと軸力を受けない工夫をすることで、横力専用の損傷部材としての機能を持たせる事にある。本形状は（図1参照）、間柱を3分割した中間2点から両側柱端部に向って方杖を4本配置する形状とする。方杖の端部は、木材にビス留めされた金物とボルト接合とする。フレームに生じる水平力は、方杖を介して間柱接合位置で間柱に回転モーメントを生じさせる。よって、間柱の曲げ剛性により、間柱は弾性の復元力を持つこととなる。軸力を負担していないので損傷部材となっても問題がなく、振動エネルギーの増大を抑制する制振ダンパーとして働くことになる。

6. 壁倍率を基準とした設計

法律は木造住宅はその多くが在来軸組構法であり、その設計方法としては、壁倍率を基準量と考えた壁量計算、あるいは、許容応力度設計が広く行われている。

これらの設計法において、水平力に対しては、鉛直構面の存在壁量（認められた仕様の鉛直構面の長さ（壁長）にその壁倍率を乗じた合計値）が、その建物で必要とされる壁量（必要壁量）を超えていることが判断基準の一つである。この基準量となっている壁倍率とは、静的加力試験の結果より4つの状態の耐力を得て、その最小値を代表値として算出された値である。よって、対象とする建物に必要な壁量を満足する壁量が存在することが確認できれば、基本的には、その建物にはどの変形時でも必要耐力以上の耐力

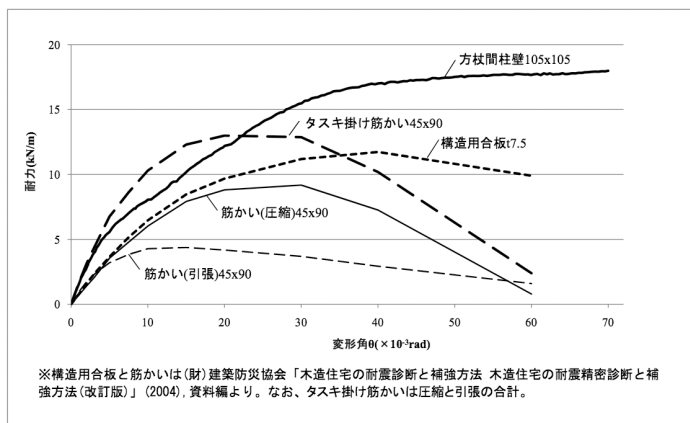


図2 各要素の骨格曲線
Fig.2

表1 各要素の壁耐力と壁倍率
Table 1

| 材種 | 耐力 (kN) 1P(=910mm)当り | | | | 基準耐力 (kN) | 壁倍率 (換算値) |
|------------------------------|----------------------|-------|-------------|--------------|-----------|-----------|
| | a) Py | b) Py | c) 2/3・Pmax | d) Pu*0.2/Ds | | |
| 筋かい45x90圧縮 ※1 | 6.60 | 6.10 | 7.86 | 5.13 | 5.13 | 2.88 |
| 筋かい45x90引張 ※1 | 4.61 | 3.59 | 5.20 | 3.94 | 3.59 | 2.02 |
| 筋かい45x90タスキ掛け | | | | | 8.73 | 4.89 |
| 構造用合板 厚9mm くぎN50@150mm ※1 | 4.99 | 5.59 | 6.15 | 5.70 | 4.99 | 2.80 |
| 方杖間柱105x105 ※2 | 7.97 | 6.80 | 10.86 | 6.84 | 6.80 | 3.81 |

※1 (財)日本住宅・木材技術センター「木造軸組構法住宅の許容応力度設計(2008年版)」
参考資料1より

※2 ハウスプラス確認検査(株) 性能試験報告書より

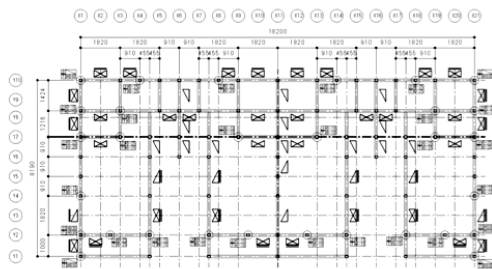
が存在することとなり、水平力に対して必要な性能を持っていることになる。なお、この4つの状態の耐力とは、a) 降伏耐力、b) 特定変形時（加力方法により1/120か1/150）の耐力、c) 最大耐力×2/3、d) 終局耐力×0.2/Dsである。

現在一般的に行われている壁量設計や許容応力度設計において、実際の建物が保有しているにも関わらず設計上無視されている値には、壁倍率決定時に無視された3つの指標値のほか、壁量として考慮されていない仕上げ材の壁耐力、筋かい座屈時の仕上げ材の面外変形の拘束効果、組合せ倍率の加算値上限規定などがある。また、壁倍率は静的試験結果により算出されるが、一般に静的に比べて加力速度が存在する場合には剛性や耐力は高くなる傾向にあるので、地震時の壁耐力は静的時に算定された以上の値となると考えられる。

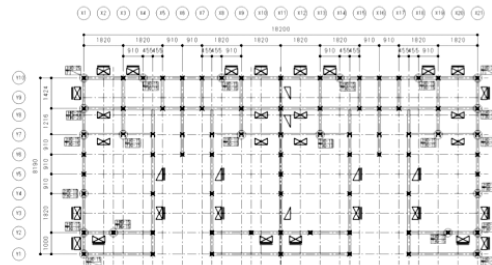
このように、壁量を基とした設計では、対象とする建物が安全側であることは確認できるが、その建物にどの程度の余裕があるのかを判断することは難しいのである。このことは壁量を基とする耐震診断においても同様である。

7. 方杖付き間柱ダンパーの性状

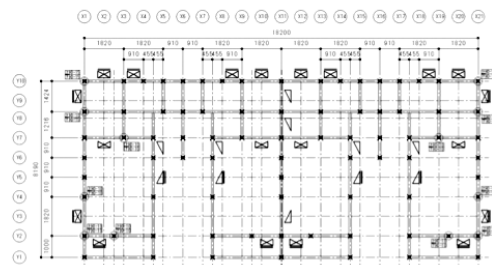
図2は、タスキ掛け筋かい壁、構造用合板壁、並びに開発物件の方杖付き間柱壁の性能評価試験によって得られた骨格曲線である。この骨格曲線を見ると、方杖間柱壁が他



1階筋かい伏図



2階筋かい伏図



3階筋かい伏図

図3 共同住宅 筋かい伏図
Fig.3

の壁要素よりも性能が良いように見える。特徴的なことは、タスキ筋かい壁の耐力は層間変形角1/30を超えると下がってくるのに対して、方杖間柱壁は層間変形角1/50までタスキ筋かい壁より耐力は低いが上がり続け、層間変形角1/15でも耐力は低下せず靱性が高い要素であることである。すなわち、方杖間柱壁は、損傷限界時はタスキ筋かい壁よりも性能が劣っているものの、安全限界時には性能を十二分に発揮する部材であるといえる。

また、これら要素の壁倍率を示したものが表1である。この表には、壁倍率を決定するために静的実験から取り出される4つの指標値も示されている。なお、設計時に適用される壁倍率には、さらに、その要素が使用される場所、耐久性、施工生などの低減係数が掛けられることとなり、最終的には構造用合板は2.5、タスキ掛け筋かい壁は4、方杖間柱壁は3.4となる。この壁倍率の数値から壁の優劣を単純に判断すると、方杖間柱壁の性能は、構造用合板より高く、タスキ掛け筋かい壁よりは劣っているように捉えられる。

このように、履歴曲線では方杖間柱壁の性能がタスキ掛け筋かい壁よりも安全限界時は良いものが、一つの数値しか使用しない壁倍率ではタスキ掛け筋かい壁が優位であると判断されてしまうことになる。壁倍率だけでは、各要素がもつ本当のP-δ特性は無視されるので、実際の建物の性能を予想することには難がありそうである。

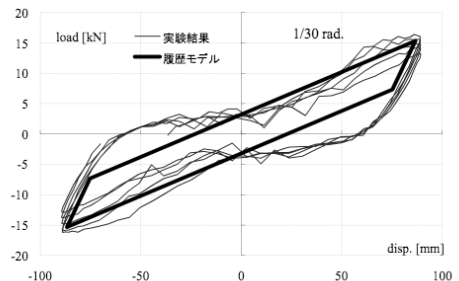
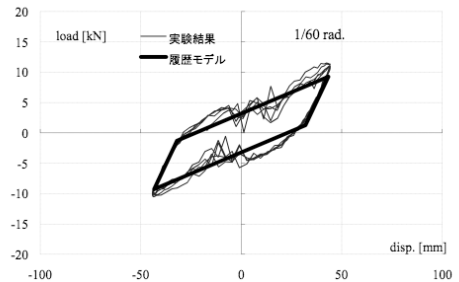
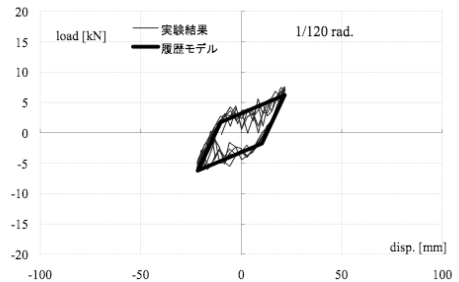


図4 方杖付き間柱ダンパー動的履歴曲線
Fig.4

8. 等価壁量を有する建物の地震応答解析

ここでは、時刻歴応答解析を行って、一つの参考例ではあるが、より実状に近い地震時性能を把握することを試みる。検討の対象は、3階建ての共同住宅（在来軸組構法、図3参照）の長辺方向とし、解析モデルは質点モデルとする。木造在来軸組構法の一般的な耐震要素の復元力モデルについては統一的な見解には至っていないが、標準型バイリニアとスリップ型バイリニアの組み合わせ¹⁾で復元力特性を表わすことにし、筋かいと構造用合板はこの復元力特性にてモデル化する。このモデル化では壁量だけがパラメータとなるため、筋かいとか合板といった要素種別は無視されることになる。

一方、方杖間柱壁の復元力特性は、方杖間柱壁が間柱の曲げ剛性を利用していることから、動的加力時の履歴曲線（図4）に示すように標準型バイリニアの復元力特性でモデル化する。なお、比較に当たっては、筋かいと構造用合板による建物（「筋かい+合板」と表示）と、その建物と等価な壁量を持つと仮定した方杖間柱壁のみによる建物（「方杖間柱壁」と表示）とを比較する（表2参照）。地震レベルは、Level1（損傷限界時）最大25cm/sec、Level2（安全限界時）最大50cm/secとし、観測波4波を入力する。建物の減衰は、瞬間剛性比例型とし1次モードに対し減衰定数 $\eta=3\%$ を採用する。

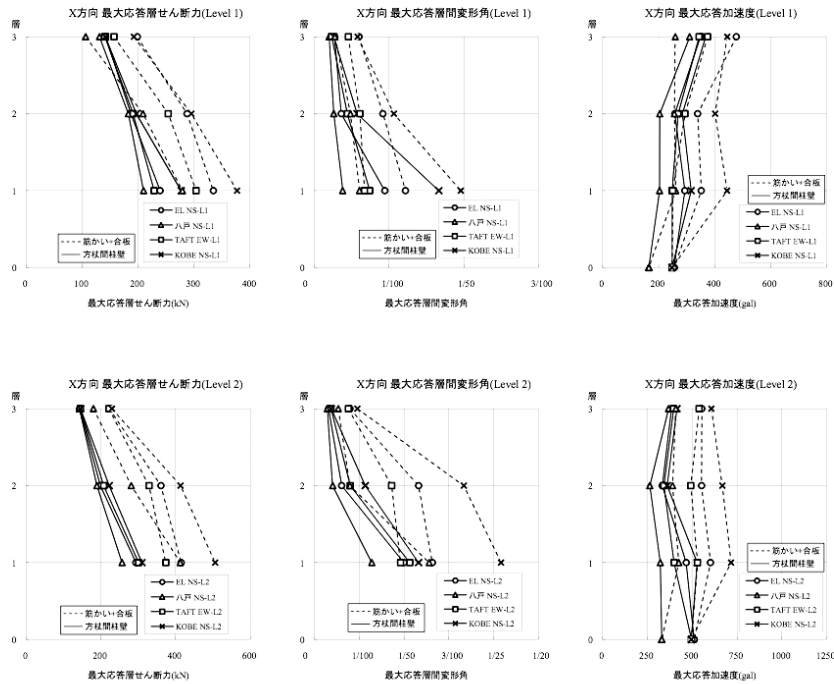


図5 地震応答解析結果一覧
Fig.5

両建物の壁量は同じであるので、壁量設計あるいは許容応力度設計からは違いがないことになるが、地震応答の結果はどうなるであろうか。

図5、表3に応答結果を示す。Level1、Level2ともに、また、層せん断力、層間変形角、加速度の各成分とも、方杖間柱壁による建物が筋かい+合板による建物よりも性能が良いといえる。ちなみにKobe波では、方杖間柱壁による建物の応答は、筋かいと構造用合板による建物の応答に比べて、Level1で0.4~0.8、Level2で0.3~0.7である。

方杖間柱壁は、骨格曲線から損傷限界時 (Level1) に対しては劣り安全限界時 (Level2) には優れている傾向があるので建物応答もその傾向になるかと思われたが、今回のケースではLevelに関わらず各成分とも方杖間柱壁の建物が良好な結果を示したのである。

このように、同じ壁量であっても、地震応答検討においては同じ性状を示さないことが確認できる。

9. 結語

現状の木造住宅における耐震要素は、過去の木造被害を教訓として、接合金物や釘ピッチに至るまで法律により厳格に規定されている。しかしながら、壁倍率の評価方法は従来のままであり、上に述べたように真の建物性能を表現する物理量とはなっていない。このように法律は、ある一面は厳格でありながら、他面では新しい知見や新しい工夫を阻んでいる現状がある。よりよい設計を行うためには、木造建物の法体系が真の工学的性能を表現する体系になっている必要がある。さらに、法律が設計者のより高い性能実現を阻むものであってはならない。

表2 建物モデルの壁量

Table 2

| 階 | 必要壁量(m) | | 筋かい+合板による建物 存在壁量 | | | | 方杖間柱壁による建物 存在壁量 | | | |
|----|---------|-------------|---------------------|---------|----------|------|--------------------|------|---------|----------|
| | 令46条① | S62建告1899号② | 壁倍率 | 各壁部材の長さ | 各階の壁量(m) | 充足率① | 充足率② | 壁倍率 | 各壁部材の長さ | 各階の壁量(m) |
| 3F | 26.73 | 62.18 | 5倍 | 18P | 111.02 | 4.15 | 1.79 | 3.4倍 | 35P | 108.29 |
| | | | 4倍 | 8P | | | | | | |
| 2F | 50.49 | 107.80 | 5倍 | 18P | 140.14 | 2.78 | 1.30 | 3.4倍 | 45P | 139.23 |
| | | | 4倍 | 16P | | | | | | |
| 1F | 68.31 | 140.80 | 5倍 | 18P | 154.70 | 2.26 | 1.10 | 3.4倍 | 50P | 154.70 |
| | | | 4倍 | 20P | | | | | | |

表3 地震応答解析結果一覧

Table 3

| 応答結果一覧 | | (比率)は(方杖間柱壁)/(筋かい+合板壁)の値 | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------|--------------------------|-------|-------|--------------|-------|-------|-----------|-------|-------|------|
| 入力地震波 | 層 | 最大層せん断力 kN | | | 最大層間変形角 rad. | | | 最大加速度 gal | | | |
| | | 筋かい+合板壁 | 方杖間柱壁 | (比率) | 筋かい+合板壁 | 方杖間柱壁 | (比率) | 筋かい+合板壁 | 方杖間柱壁 | (比率) | |
| Level1 (25kine) | El Centro-NS | 3 | 198.7 | 141.9 | 0.71 | 1/167 | 1/370 | 0.45 | 477.7 | 349.5 | 0.73 |
| | | 2 | 287.5 | 187.3 | 0.65 | 1/109 | 1/278 | 0.39 | 339.5 | 258.0 | 0.76 |
| | 八戸-NS | 3 | 334.5 | 239.4 | 0.72 | 1/82 | 1/106 | 0.77 | 352.5 | 293.8 | 0.83 |
| | | 2 | 106.4 | 131.1 | 1.23 | 1/362 | 1/504 | 0.72 | 259.3 | 311.0 | 1.20 |
| | Taft-EW | 3 | 208.9 | 182.8 | 0.87 | 1/207 | 1/386 | 0.54 | 256.5 | 204.1 | 0.80 |
| | | 2 | 279.4 | 209.9 | 0.75 | 1/165 | 1/263 | 0.63 | 261.1 | 203.3 | 0.78 |
| | JMA Kobe-NS | 3 | 157.1 | 140.7 | 0.90 | 1/220 | 1/428 | 0.51 | 375.1 | 344.7 | 0.92 |
| | | 2 | 254.0 | 191.1 | 0.75 | 1/164 | 1/226 | 0.73 | 294.3 | 270.3 | 0.92 |
| | JMA Kobe-NS | 3 | 303.7 | 228.8 | 0.75 | 1/149 | 1/135 | 1.10 | 250.6 | 247.9 | 0.99 |
| | | 2 | 192.6 | 141.6 | 0.74 | 1/173 | 1/384 | 0.45 | 445.1 | 367.9 | 0.83 |
| | JMA Kobe-NS | 3 | 295.1 | 197.0 | 0.67 | 1/94 | 1/175 | 0.54 | 401.9 | 284.8 | 0.71 |
| | | 2 | 377.0 | 277.1 | 0.73 | 1/51 | 1/60 | 0.85 | 444.8 | 316.2 | 0.71 |
| Level2 (50kine) | El Centro-NS | 3 | 222.8 | 143.5 | 0.64 | 1/126 | 1/315 | 0.40 | 553.5 | 384.5 | 0.69 |
| | | 2 | 360.9 | 198.6 | 0.55 | 1/43 | 1/164 | 0.26 | 552.3 | 333.0 | 0.60 |
| | 八戸-NS | 3 | 414.9 | 293.9 | 0.71 | 1/38 | 1/50 | 0.76 | 601.9 | 466.6 | 0.78 |
| | | 2 | 180.1 | 142.5 | 0.79 | 1/187 | 1/346 | 0.54 | 408.3 | 368.1 | 0.90 |
| | Taft-EW | 3 | 281.4 | 189.4 | 0.67 | 1/126 | 1/246 | 0.51 | 390.3 | 263.3 | 0.67 |
| | | 2 | 412.8 | 256.7 | 0.62 | 1/39 | 1/78 | 0.50 | 425.2 | 322.3 | 0.76 |
| | JMA Kobe-NS | 3 | 221.4 | 145.3 | 0.66 | 1/132 | 1/269 | 0.49 | 538.6 | 396.4 | 0.74 |
| | | 2 | 329.0 | 207.4 | 0.63 | 1/58 | 1/125 | 0.46 | 492.0 | 342.0 | 0.70 |
| | JMA Kobe-NS | 3 | 373.9 | 301.2 | 0.81 | 1/52 | 1/47 | 1.11 | 529.5 | 398.8 | 0.75 |
| | | 2 | 229.6 | 145.5 | 0.63 | 1/104 | 1/266 | 0.39 | 607.3 | 415.3 | 0.68 |
| | JMA Kobe-NS | 3 | 413.4 | 222.3 | 0.54 | 1/30 | 1/88 | 0.34 | 668.0 | 360.7 | 0.54 |
| | | 2 | 505.9 | 310.2 | 0.61 | 1/24 | 1/43 | 0.56 | 717.2 | 527.5 | 0.74 |

参考文献

1) JSCA編「木造 建築構造の設計」、オーム社、2004.8