

「木造住宅における耐震・制震・免震の比較考察」

(有)MASA建築構造設計室
代表取締役 真崎 雄一

1:住宅の耐震技術の考え方。

地震多発地帯の我国において、今後、何時、発生してもおかしくない大地震は建築基準法の想定をはるかに上回る規模のものと言われている。真に強く、安全な住宅とはどのようなものであるか？建物が壊れる要因は何なのか？現象を正しくとらえる構造設計法とはどのようなものか？建物の性能とはいかなるものか？等々、その考え方とそれに対処した工法は日々進化している。このような背景をもとに、住宅の耐震技術の最先端を主に構造設計的観点から考察してみる。

2:直列バネと並列バネの意味を建物において考える。

直列バネは弱いバネと強いバネを1列に並べて両端を引張った場合に弱いバネと強いバネに生じる力は同じだが、弱いバネが強いバネより大きく変形することで、釣り合いを保つ状態の事である。並列バネは弱いバネと強いバネを並列に並べて両端を引張った場合に2つのバネの変形は同じであるが弱いバネと強いバネが強さ（剛性）の比で釣り合いを保つ現象である。つまり、直列バネは変形で、並列バネは力で釣り合いを保つということである。「図1参照」住宅に用いる合板、筋かい等の構面材は各々耐力の強さの指標である、壁倍率をもって各階に配置されている。建物が地震、風等により横力を受けた場合に上階の床面の水平耐力が大きければ（剛床仮定成立）各々の構面材は同じ変形を受ける状態になり、各々の構面材、すなはち、合板、筋かい等は自身のもつ耐力に応じて力を負担する事になる。変形一定で力が自由、これは層内並列バネの原理である。しかし、上階の床面の水平耐力が小さく（剛床仮定不成立）の場合と構面材の平面的な配置のバランスがよくない場合は各列がバラバラになったり、片側の構面のみが大きく変形したりする。この現象は並列バネの原理から層内直列バネの原理に移行していることになる。木造の計算では偏芯率の規制でその危険性に配慮している。では、各層の関係、つまり1階と2階の関係はどうか。

重力の作用する、鉛直力に対しては「直列バネ」の原理が働く為にある層の柱の耐力不足は直ちに建物の致命的大破壊になる。

2階の床位置と屋根の軒桁位置に加わる水平力に対しても地震の場合は各層の重さ（質量）風の場合は各層の負担する壁の面積により、一定力です。その場合に柱の細い最近の在来構造は各層に生じる水平方向の変形は自由である。力が一定で変形が自由、これは各層直列バネの原理である。「図3参照」

3:建物が壊れる要因は力ではなくてエネルギーである。

エネルギーとは仕事のことです。1N(ニュートン)の重さを1m移動した場合に、仕事量は重さ×距離で1N・m(1J)の仕事量と呼ぶ。重さを力、距離を変形と置き換えると力×変形をエネルギーと呼べる。今までの力の世界からエネルギーの世界で現在の住宅の安全性を見直すと私たちが見過ごしていた新しい知見をうる事が可能になる。

エネルギーの世界で考えると耐震構造、制震構造、免震構造を統一的に理解することが容易になる。国交省より昨年の平成17年9月1日に施行された「エネルギーの釣り合いに基づく耐震計算法」の概念は構造物の耐震性を直接エネルギーで評価を行うことが出来る新しい計算法である。地震時の地動の加速度に建物質量を乗じること、つまり慣性力のみを建物に加わる力としていた考え方から、慣性力×慣性変形(慣性力により建物に生じる変形)を建物に加わる入力エネルギーと言う考え方を採用したものである。「図2参照」一方、入力エネルギーに対して、建物本体が損傷によりエネルギーを消費することでエネルギーの釣り合いを保つと言う考え方である。この思想で重要な事は通常の建物は建物本体が壊れるつまり損傷を前提としなければ地震で建物に加わる入力エネルギーを消費できない。結果としてエネルギーの釣り合い式が成り立たなくなる事である。

4:地震力はパワーをもつ振動エネルギーです。

地震力は振動エネルギーである。当然、振動エネルギーを建物の入力エネルギーとしなければならない。

従って、建物の損傷を抑えるためには如何に入力エネルギーを少なくするか、もしくは過大な入力を抑えるかに懸かっている。振動には共振現象があり、地盤の振動周期(地盤の固有周期)と建物の持つ振動周期(建物固有周期)が合わさると2倍から3倍に入力エネルギーが増大する。

しかし、過去の地震を統計的にみると建物固有周期順に並べたエネルギー入力(速度応答スペクトル)は概ねある傾向があり、建物固有周期によっても入力エネルギーの大きさにかなりの差が生じる。木造建物の初期の固有周期は0.3前後であるが、建物が損傷を始めると建物固有周期が変化し、固有周期が0.6~0.8前後に長くなる、速度応答スペクトルは1.0までは入力が大きくなるので木造建物計は非常に不利な範囲にある。

又、地盤の硬軟で建物の振動エネルギーを増大させたり、減衰させたりする性質がある。

5:建物は弾性範囲を超えると塑性状態に移行する。

建物の構造体が水平力を受けて変形する場合の力と変形の骨格曲線を建物の復元力特性と言う。木造の建物も層間変形(階の上部と下部の変形差)が1/120を越えた時点から水平力と変形が比例する(弾性状態)から水平力の増大よりも変形が大きく進む(塑性状態)に移行する。当然、弾性状態の構造体は水平力を無くすと元にもどるが、塑性状態に移行した構造体は元に戻らず傾いたままとなる。

6:木造建物は一部の階だけ面材(合板、筋かい)を増やすと逆に危険になる。

建物は1階の層間変形と2階の層間変形が異なると変形の大きい階に変形が集中する。これは前述の如く、力が一定で変形が自由の各層直列バネの原理である。

木造建物の面材が負担水平力に応じた耐力を持っている事が重要で、必要以上の面材をある階に入れすぎると、その階はエネルギーを吸収せずに相対的に弱い、他の層だけが集中的にエネルギーを吸収しようと変形が益々大きくなる。

この現象は各層直列バネの原理に加えて、他の層だけが先に塑性状態に移行することで説明できる。「図5参照」建物共振の原理から見ると相対的に弱い層の固有周期（1次固有周期）は強い層よりも長く、その層が地盤の固有周期と同調した場合は更に変形が加速される事になる。

木造の許容応力度計算等では各階の層間変形を揃えるこの規制はない、しかし、エネルギー法ではこの現象を「損傷集中係数」という呼び名で表現し、その危険性に対して配慮している。各層直列バネと前述の層内直列バネ（偏芯による弱い列の変形）が足し合わせられる事もある。「図4参照」

7:木造建物の各階の損傷集中は大黒柱,通し柱で防ぐ事が出来る。

力が一定で変形が自由の直列バネの原理で生じる変形集中は昔の知恵で防ぐ事が可能である。伝統木造で用いる大黒柱、太い通し柱は各階の変形を一定にする役目を果たす。

つまり、変形でバランスを取る各層直列バネの原理から力でバランスをとる各層並列バネの原理にすることで各階のもつ面材の剛性に応じた、エネルギー消散を効率よく全て働かせる事が出来る。「図3参照」

但し、在来軸組みで使用される細く、しかも、梁ホゾで欠損の多いものは変形を上下に分配する前に水平力で折れたり、抜けたりするので、この点の解決が必要である。

8:エネルギーの釣り合いからみた、耐震・制震・免震の原理

耐震・制震・免震は従来の力だけの物差では、別々の説明が必要であるが、エネルギー法の力×変形の考え方だと共通の説明が可能である。つまり、同じ耐震構造も剛構造と柔構造に大別されますが。剛構造は地震の入力エネルギーに対して大きな力と小さな変形の弾性振動エネルギーを主として消費エネルギーとする構造である。柔構造は揺れ幅を大きくすることで力を小さくしかつ木部の接合部のめり込みを許容する、弾塑性状態による歪みでエネルギー消費する構造である。

制震構造は耐震構造の持つエネルギー消費に加えて振動を抑制する為のダンパーを付ける構造である。ダンパーが熱エネルギーを消費することで、揺れ幅を小さくし、かつ、過大な加速度を抑える。免震構造は耐震・制震の原理を組み合わせ、建物基部に積層ゴム・滑り支承・転がり支承等を設置し、建物の変形を極端に大きくし、建物の固有周期を長くする事で、地盤の固有周期と大きくずらし、建物の共振による過大な加速度、速度を抑える。従って免震構造は建物の損傷・倒壊を防止するばかりでなく、室内の家具・什器の転倒防止、居住者の安全性も大きく高まる。

9:住宅における制震構造は繰り返し地震に威力を発揮する。

住宅における制震構造は鉄骨造住宅を除きビル建築に採用される各種ダンパーの評価と幾分異なった見方が必要である。木造フレームを動的強制加力実験すると振動を抑える減衰

定数が 10%位と大きくなる。これは木材の構成するセルローズが粘弾性体である為に、既にある種のダンパー効果を持っているからとも言える。

一方、損傷制御設計の概念から木造住宅制震の真の目的を考えて見ると確かに木造の減衰定数は鉄骨構造の 3 倍、鉄筋コンクリートの 2 倍と減衰性能は優れている。

しかし、新潟中越地震で発生した地震の如くに震度 7 の 1500 ガルの本震のあとに震度 5 クラスの余震が 10 回に近くも発生した場合には塑性化消費エネルギーを早々に使いこなし、遂には倒壊に至ることは今回の倒壊事例をみても明らかである。

その点で、制震住宅に設置する付加ダンパーは何回も繰り返して使える性能が今後は特に求められる。減衰タイプとしてはビルに採用されている全てのタイプは設置可能であるが木造住宅のコストと接合部の特殊性から現在市販されているものは 粘弾性体ダンパー オイルダンパー 高減衰ゴムダンパーがある。今後、色々な設置位置とタイプ、又、組み合わせたハイブリットタイプ等が市場に出されると考えられる。粘弾性体ダンパーの制震例を時刻歴の振動応答解析をすると標準仕様で損傷の程度が約 30% ~ 40% 軽減される。しかし、木造は軽い為に強風による風荷重に対して必要最低限の剛性と耐力は確保する必要がある。

10:住宅における免震構造は制震構造の究極版である。

免震構造は制震構造における、ソフト・ファースト・ストーリーの究極版とも言える、しかし、住宅の耐震構造で共通の課題である建物が軽いことによる特殊性を忘れてはならない。つまり 地盤対策 強風対策の 2 つである。高度な工学的振動モデルで計算することによって成り立つ免震構造は特に重要である。通常地盤の持つ固有周期を 1 秒以下と仮定し建物の固有手周期を 2 ~ 4 秒により設定することにより地震による横力を絶縁することである。従って建設地の地盤の選定が欠かせない。軟弱地盤を避け、場合は土質条件を見極めて地盤改良等を施す必要がある。又、共振を防ぐ免震の利点は強風では逆に建物が過大に移動する欠点を持つ市場の工法はこの点に関して種々の解決策を提案している。

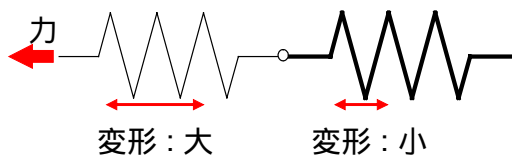
構造以外に同時に考慮しなければならない事は 可動部スペースと室内側の断熱対策 可動部の雨水の浸入対策 可動部の電気・ガス・水道・排水等の設備機器対策 保守点検必要性が上げられる。免震工法の採用に際しては通常の工法以上に施主・意匠設計者・構造設計者・工事業者・メーカーと設計・工事の緊密な打ち合わせが大切である。

11:これからは性能設計の時代

建物性能を設定するのは購入者である施主である。例えば自動車を購入する場合は価格・デザイン・走行性能・操作性・安全性・メンテナンス等々を購入者はカタログを比較検討し、真剣に検討する。場合によっては試乗してまで走行性能・操作性を調べる。住宅はどうであるか？住宅の場合は自動車よりはるかに高い買い物にもかかわらず性能に無関心な項目がある。それは自動車と言う走行性能・操作性・安全性である。これからの住宅は強風、地震に対して文字通りの不動産でなく動くものである。其の意味で住宅における耐震・

制震・免震の理解は建物が外力に対して不動産でなく動産であることを知ることから始まる。

直列バネ



並列バネ

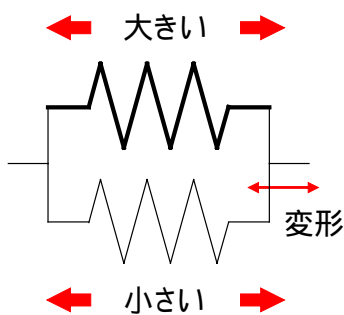
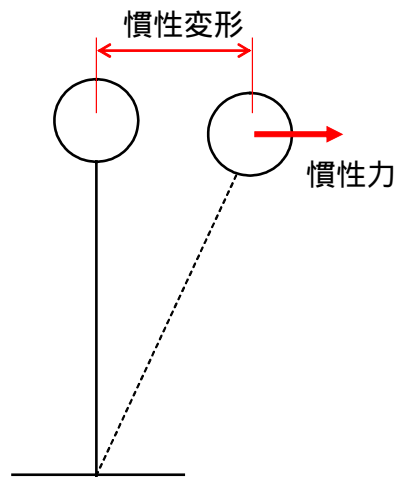


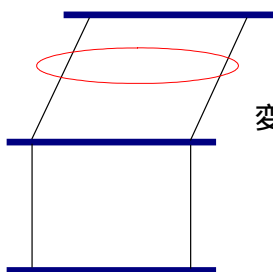
図1 直列バネ・並列バネ



力 × 変形 = エネルギー

図2 慣性変形・慣性力

各層直列バネ



各層並列バネ

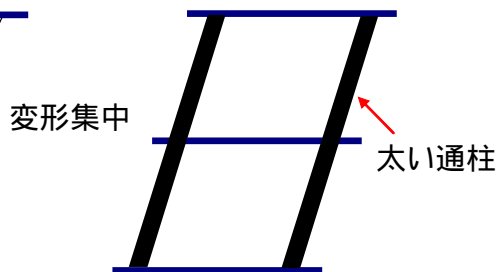


図3 各層直列バネ・層内並列バネ

変形集中

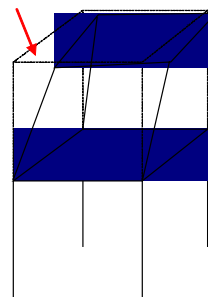


図4 各層直列バネ+層内直列バネ

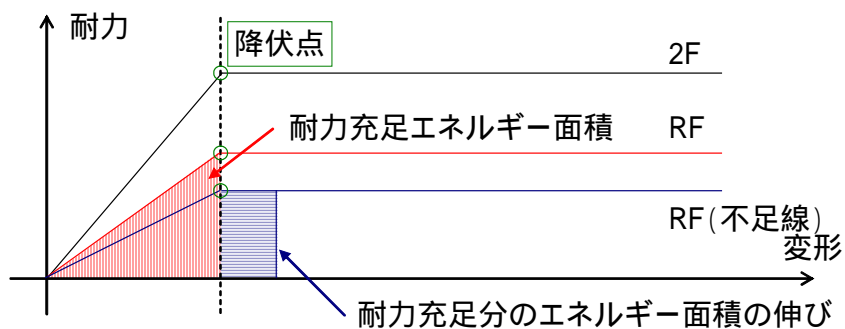


図5 損傷集中説明図