

住宅における耐震・制震・免震の理解

有限会社 MASA 建築構造設計室 代表取締役 真崎 雄一

1:住宅の安全性を取り巻く環境

近年、宮城県沖・東海・東南海・南海地震等の大地震の到来が予告されている最中 2004 年 10 月 23 日に震度の最強 7 の新潟中越地震が発生しました。又、前後して日本列島に相次いで上陸した台風も其の数と瞬間最大風速も異常気象の影響かどうか過去の最大級を上回るものでした。今年 10 周年を迎える震度 7 の兵庫県南部地震では、テレビ・新聞の報道で一般の人にも知らされた建築基準法「新耐震設計法」で想定している地震力の強さ 300 ガル～400 ガルを大きく上回る 1000 ガル～1500 ガルであったこと。同様に新潟中越地震も震度 7 直下型の斜面崩壊に加えて 1500 ガルを更に上回る激震でした。特に震度 5 強がこれでもか、これでもかと数回に余震として続いたケースは過去には無かったタイプの地震でした。中越地震の前に北海道で起きた 2003 年の釧路沖地震は体には感じない長周期の地震が大型の石油タンクの油を左右に大きく揺さぶり押蓋を持ち上げ引火して大火災になりました。これらの現象の多くは地震学者と建築・土木の構造を専門とする構造学者と構造技術者にしか問題の意味とその重要性を知り得ない深刻なものです。

こうした状況を肌で感じた一般の人達の世論に押され国交省を始めとしこの所、既存住宅に対する耐震補強の必要性が声高に叫ばれるようになりました。新築住宅も現状の法律で建て得る耐震住宅に加えて免震住宅・制震住宅の用語も使用されるようになりました。

ここいらで私達建築構造技術者も真に強い住宅の概念を把握し、設計に生かすと共に施主である、一般の人に混乱気味の建築用語を正確かつ分かり易く伝える必要があります。

2:地震により建物が破壊する要因である「地震の強さ」とは何か？

地震が発生した場合に最初に気象庁で発表されるマグニチュードと気象庁震度です。マグニチュードは「地震の規模」を表わし、震度はその場所での「地震の強さ」です。震度は昔は墓石、建物や家具のゆれ具合、倒壊率及び人間が立っていられない等の比較的、大雑把な指標でした。しかしこれでは建物が丈夫に造られれば震度が小さくなっていくおかしな事になります。電球・蛍光灯で説明すると電球のワットはマグニチュードで離れたところの机上の上の明るさは照度のルクスです。ワットは発生エネルギーです。ちなみに 100 W 電球の消費（発生）するエネルギーはカロリー計算をすると成人の消費するカロリーとほぼ同じと言われています。ルクスはある面の「光の強さ」を表わす指標です。この例えから地震の規模を表わすマグニチュードが消費（発生）するエネルギーであることは概念的に理解ができます。残るは光の強さと同様に「地震の強さ」の工学的指標は何でしょうか？まずは「地震の強さ」の意味を正確に理解することができなければ「地震に強い」

建物はできません。現在の気象庁震度は「地震の強さ」の指標を震度で表現をしています
が、指標の根拠は地表面あるいは建物の1階に設置された地震計の加速度の数値から判断
し震度で発表していますので昔の様に丈夫な建物を造っても震度が変わる、おかしなこ
とはありません。しかし加速度計も直下型地震に生じやすい衝撃的荷重は破壊に影響を及ぼ
さない？髭と称しカットして加速度の読値を幾分修正して発表しています。と言う事は加
速度計に現れた数値をそのまま地震の強さの指標として用いる事に危惧を抱いている事を
示しています。どこまでの加速度が破壊に影響を及ぼし、又、及ぼさないかの判断は容易
ではありません。

なぜ加速度が重要であったかと言うことは私達が日常、強さの指標として昔から力が使わ
れてきたことにあります。力 = 質量 × 加速度です。建物にかかる力は建物の質量に加速
度を乗じて算出します。力は建物を破壊させる、或いは変形させる重要な指標の一つで
すが全てではありません。

3:地震と建物をボクサー同志の戦いと比較します。

地震と建物の関係をボクシングのリングで一方向的に殴るボクサーと受身の防戦に徹する
ボクサーの試合に例えます。地震は殴るボクサーで建物は受身のボクサーとします。殴る
ボクサーのパンチ力はグローブの重さ(質量)と繰り出すパンチ(加速度)を乗じた値とし
て相手のボクサーに大きなダメージを与えます。パンチのスピード(速度)と殴るボク
サーの腕の長さ(リーチ)も関係します。リーチが長いほど殴られるボクサーは長い間(時
間)力を受け続ける事になるからです。この関係を工学的に並べますと「質量 × 加速度 ×
速度 × 時間」の関係になります。質量 × 加速度 = 力で速度 × 時間 = 距離(変位)です。
結果として力 × 変位が相手に与えるダメージの総量となります。この例えから気象庁の地
震情報も加速度と地盤の変位を知らせると有用な情報となります。建物が地震により受け
るダメージの力 × 変位を「入力エネルギー」と称します。建物の場合の力は慣性力として
建物の質量 × 加速度となり、速度 × 時間の変位を乗じる事になります。

4:エネルギーはガソリンの消費量

エネルギーの概念をより深く理解する為に自動車で東京から大阪まで移動すると仮定しま
す。

ガソリンの消費量の大小は何の要因で変化するのでしょうか?何となく分かっている事を整
理しますと次の如くなります。

自動車の重さは軽自動車・普通自動車・ベンツ・トラック・バスの重量の変化

走行中の加速・減速の頻度は

自動車の速度は定常速度は50 km/hあるいは100 km/h等

走行時間は何時間を費やしたか

ガソリンの消費量(エネルギー) = 重さ(質量) × 加速度 × 速度 × 時間

ガソリンの消費量(エネルギー) = 重さ(質量) × 加速度 × 走行距離

5:地震による建物の入力エネルギー = 建物の消費エネルギー

エネルギーで考えると地震による建物の入力エネルギーに対して建物は消費エネルギーで
以ってエネルギーの収支を合わせなければなりません。何故ならエネルギー不滅（保存）
の法則によりエネルギーは形を変えても永遠に無くなることは無いからです。又
建物の消費エネルギー = 振動エネルギー（運動エネルギー + 弾性歪みエネルギー）
+ 摩擦による熱エネルギー（減衰消費エネルギー + 塑性化消費エネルギー）
振動エネルギーは建物が慣性力と復元力が交互に作用して振動することにより消費する
エネルギーですが摩擦による熱エネルギーにより振動は次第に収まることとなります。
摩擦による熱エネルギーは構造部材同志の表面摩擦・空気摩擦等による減衰消費エネルギ
ーと部材が変形するにしたがって部材が弾性域をこえて塑性域に入ると組織内部の摩擦に
より発生する熱エネルギー（分子の運動エネルギー）つまり塑性化消費エネルギーに分け
られます。

6：地震力は衝撃を伴う振動現象です。

振動現象で地盤の振動がそのまま建物の振動とは必ずしもなりません。振動には共振現象
があり地盤の振動周期と建物の周期が近いと建物はより大きく揺れ、加速度・速度・変位
が上昇します。通常の建物は過去の地震の解析例を参考に地盤振動の2 - 3倍に増幅する
と想定した設計規準になっています。

7：耐震構造には剛構造と柔構造がある。

耐震構造は広い定義に例えますと地震に耐える建物は全て耐震構造となりますが、ここ
では狭義に解釈し以後の免震・制震に対する用語として用いる事にします。

耐震構造は地震の入力エネルギーに対して振動エネルギーを主として消費エネルギーとす
る構造です。振動エネルギーも力×変位の繰り返しと考えると同じ耐震構造も抵抗力（力）
を大きくし揺れ幅（変位）少ない剛構造と抵抗力（力）が小さく揺れ幅（変位）大きい柔
構造に大別されます。1930年頃に建築構造界の2大論争であった剛柔論争も「力×変
位がエネルギー」の観点から振り返るとどちらも勝ち負けとは言い難い議論であったと言
えます。その後1935年、棚橋諒による速度・ポテンシャルエネルギー説は現在のエネ
ルギー法として秋山宏により体系化されています。剛構造的耐震構造は揺れ幅（変位）が
少ない分、加速度が上昇しその為に建物をより強固にせざるを得ない事になります。
柔構造的耐震構造は抵抗力は少なくなりますが揺れ幅（変位）が大きくなる事により粘り
強い構造が要求されます。過度の変形をする事で重要な事は摩擦による熱エネルギーが減
衰消費エネルギーに加えて構造部材の内外破壊による塑性化消費エネルギーで消費した場
合のことです。塑性歪みが蓄積された構造部材の破壊は取りも直さず建物の損傷、倒壊と
同じです。特に新潟中越地震のように繰り返しの地震に対しての建物の安全が保証されな
いこととなります。

8：制震構造とは損傷制御設計の具現化です。

和田章らの提唱する損傷制御設計の概念は Sacrifice（サクリファイ）犠牲つまりクリスチ
ャン用語で生贄を捧げる意味の言葉です。先述の塑性化消費エネルギーをあらかじめ用意

された別の部材を消費エネルギーとすることで本体の構造部材の損傷制御し建物の倒壊を防止することです。結果として振動を制御することから制震構造といわれる。ちなみに「制震」を地震だけでなく交通振動、強風振動にも有効と考えて「制振」と呼ぶこともある。犠牲部材は「制震ダンパー」と称しダンパーはダンピング材つまり減衰材の事です。ダンパーには多くの種類がありますが大別してパッシブ（受動）型とアクティブ（能動）型があります。

パッシブ型は地震による建物の揺れを利用しながら減衰させるものです。アクティブ型は地震の揺れをセンサー等によりいち早く感知して減衰させる機構を持つものです。地震の揺れセンサーの例として JR 上越新幹線が新潟中部地震で実証した早期感知システム「コレダス」が良く知られました。作動方式としてマス・ダンパーと呼ばれる振り子式のものからオイル・ゴム・粘弾性体・鉛・鉄・塑性合金の内部摩擦方式とステンレス等を使用した表面摩擦を利用するものがある。

オイルダンパーは粘性ダンパーの代表的なもので自動車に使われるショックアブソーバーと言えば誰でも分かります。減衰のタイプとして粘性ダンパーは早い速度に比例して減衰が大きくなるのに対して鉛・鉄・塑性合金等は履歴ダンパーと呼ばれ変形が大きくなる程に減衰が増す性質がある。表面摩擦を利用するものは建物の動きを制御するブレーキパットと言えれば理解が早くなります。粘弾性体は合成ゴム系、アクリル樹脂系があるがゴムの弾性の性質に粘性ダンパーの性質を併せ持ちます。

「力×変形」のエネルギー的な考えに拠りますと、ダンパーと言えども建物の加速度と変形を同時に劇的に抑える事は至難の業であり、構造設計者の設計意図の明確さと高度の判断が要求されます。

制震構造の設置位置は建物の頂部・各階と特殊な例として建物の 1 階のみに集中して配置する型に分類できます。1 階を上層階に比較してやや柔らかく設計すると建物の消費エネルギーは 1 階に集中することから、1 階に集中的にダンパーを配置する事によりダンパー効率を上げ、かつ明確な崩壊形を持つ構造設計が可能になります。

フレキシブル・ファースト・ストーリー又はソフト・ファースト・ストーリーと呼ばれます。

9: 免震構造とは制震構造の特殊例の一つです。

免震構造も制震構造と同じ思想を持つ「損傷制御設計」の代表的構造ですが免震構造と制震構造を合わせて「応答制御構造」と呼ばれることもあります。免震構造は制震構造の特殊な例であるソフト・ファースト・ストーリーの究極版と考えられます。

但し、次の 2 点が制震と異なる免震の思想として挙げられます 建物の重さを支える柱の直下に積層ゴム・滑り支承・転がり支承等を設置することで地震の横力に対して縁切り・絶縁(Isolation)することです。机に載せた分厚い本の下に下敷きを挟みすばやく引き抜くと本はそのまま下敷きが抜ける原理と同じです。

建物自身の持つ固有の周期を極端に長くして地震の周期と大きくずらすことで建物の共

振による加速度・速度の増大を抑えることです。

実際の建物は と の考えをバラバラに用いる事は無く組み合わせて採用します。

しかし の思想は北海道の地震のような長周期の地震の存在の為に設計の際に配慮が必要です。

そこで実際の免震建物としては制震構造で用いられるダンパー機能を併用することで消費エネルギーを稼ぎながら且つ共振による加速度・速度の増大を低く抑えることになります。

又、建物が横移動した後に元に引戻す復元力のあるバネの働きも必要です。

従って、免震部材は、支持・絶縁・減衰・復元の4つの機能を満足させる必要があります。

11:住宅における基礎地業と耐風構造も忘れてはなりません。

住宅の安全性の検討において中層の鉄骨構造・鉄筋コンクリート構造等と決定的に異なるものがあります。建物の重さが軽い為に建物の耐力が台風つまり強風により決定されることがあり、常に地震力と共に強風の外力に対する安全性を確保しなければならない事です。建物の軽さは中層のビルではそのままでは建てられない地盤の支持力の小さい軟弱な場所にも建設されることです。特に市街地の狭小敷地に多く建てられている木造の3階建て住宅は間口幅が狭く風力検討が重要です。低層の住宅に作用する風力は動圧ではあっても周期が10秒以上と木造の固有の周期とかけ離れて入るために周期性の無い静圧に近いものです。又、地盤も更地と言ども表層は埋め土が多い為に基礎地業の重要性は地上の耐震ばかりに目が行きがちな昨今は特に大切な事です。住宅における耐震・制震・免震にも全て共通な基本事項として具体的な地盤の締め固めと方法について述べます。

基礎地業の基本は、地盤の締め固めです。締固めとは、土の中の間隙を排除して沈下しにくい安定した地盤を形成することです。砂や砂利などの非粘着性の土に対しては、締固め効果の大きい振動ローラー、振動コンパクター（平ランマ、プレートコンパクター）、ランマ（タンパー）などです。一方、適度に粘着力あるシルト質土の締め固めは、タンピングローラー・タイヤローラーを使用します。特に盛土においては砂、砂利、最近では再生骨材（クラッシュラン）による置換工事が有効です。住宅の基礎工事では道路路床工事仕様が参考になりますが、大型のローラーの使用が不可能な場合でもせめて振動ローラー（5.5kN級）をお薦めします。其の際、砂利、砂の撒出し厚さが締め固めを確実なものとするために重要です。撒出し厚さ100mm以下とし6往復以上繰り返す必要です。

12:住宅における耐震構造の特殊性

住宅における剛構造的耐震構造は木造住宅では合板で耐力構面を構成する2×4住宅があります。柔構造的耐震住宅は貫材、土壁、柱と梁の仕口で耐力を負担する、昔から建てられている伝統的な民家があります。筋交と合板で構成される軸組み構造は最近、梁・桁・柱・基礎との接合に十分な金物が使用されており剛と柔の中間に位置する剛性を持っています。剛構造・柔構造は倒壊時の変形に違いがあり其の差は層間（下階の床面と上階の床面との間）の変位が剛構造1/30（約10cm）と柔構造1/10（約30cm）位です。いずれも摩擦等による消費エネルギー（減衰消費エネルギー+塑性化消費エネルギー）は減

衰定数としてみると鉄骨造 3%及び鉄筋コンクリート 5%に対して 10%位と木造の耐震構造は消費エネルギーが大きく、木材同志・木材と釘・木材と内外仕上げ材の摩擦による消費エネルギーを既に持ち、ある種ダンパー効果を持っています。木造住宅は主要部材の破壊から完全倒壊までの履歴が多様であり一律の安全限界時（倒壊時）の層間変位の定義が決定できない難しさがあります。

13: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す。在来軸組木造3階建てを時刻歴振動解析の簡易版である限界耐力法で試設計してみますと実大の建物で得られた安全限界時（倒壊時）の等価粘性減衰定数が 10%位出るために振動の減衰率による加速度の低減率が 0.7 位と非常に大きい数値となります。この数値にダンパーによる付加減衰定数の目標を例えば 5%と加算した安全限界時等価粘性減衰定数を 15%の加速度の低減率が 0.6 位と大幅な低減率にはならない事になります。そこで地震の振動現象による共振を低減するだけなら合板、筋交を減らして制震ダンパーを増やせばそれなりに付加減衰定数は大きくなります。しかし先述のように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しなければなりません。

一方、損傷制御設計の概念から木造住宅の制震の真の目的を考えて見ます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ます。

しかし新潟中越地震で発生した地震のように震度 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す。

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ます。現在の木造に使われる製品は 柱・梁の仕口に設置するもの。鉄板・合板等の面材の中央に設置するもの。鉄板・合板等の面材の重ね合わせ面に挟み込むもの。

筋交の端部に設置するもの 筋交の軸の中間に設置するもの。に大別されます。

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す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ります。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ます。

14:住宅における免震構造

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りません。つまり 強風対策 地盤対策の 2 つです。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す。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す。従って建設地の地盤の選定が欠かせません。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ります。又、共振を防ぐ免震の利点は強風では逆に建物が過大に

移動する欠点になります。強風対策の手法としては次のケースが考えられます。通常は免震機構をロック状態にして地震センサー等の感知によりロックを解除する。通常は免震機構を働かせ風速センサー等の感知によりロックをする。又は台風の気象予報を聞き、手動でロックをする。通常はロック状態で地震の規模を感知して機械的にロックを解除し、ある時間を経て自動的にロックする。等が考えられます。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ます。

いずれにしても通常の建物では問題のない外力に対して敏感に反応する免震構造は台風と地震の同時発生を想定した場合は復帰のタイミングの時間設定が考慮されていますがより確実な工夫で信頼性のある機構が今後の研究課題として残されています。

建物の軽さは通常のビル免震と異なり支承材は滑り支承が多く採用されています。ベアリングを内蔵したり、テフロン平板が使われています。免震は地盤の周期と建物の周期ずらす事で成立するシステムですが減衰装置による付加減衰を考慮する事でエネルギー消費させる事でトータルな性能を上げる事が可能です。支持・絶縁・減衰・復元の4つの機能の高度なバランスが求められます。構造以外に同時に考慮しなければならない事は 可動部の断熱対策 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ます。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す。

15: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す。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、真剣に検討します。場合によっては試乗してまで走行性能・操作性を調べます。住宅はどうでしょうか？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ります。それは自動車で言う走行性能・操作性・安全性です。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す。無関心の現因の一つは建物の安全性は建築基準法により国が確実に担保してくれていると多くの人が考えているからです。

地震災害は人知では計り知れない自然現象です。そこで地震による外力を規定し国民の総意として最低基準の安全性を法律が設定する事はある意味必要不可欠なものです。しかし国民の生活レベルが上がった今日、より安全な、より性能の高い住宅を建設する、購入する事は

時代の要請です。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ります。