

住宅の地震被害と耐震



特集2
ハイテク推進
セミナー

京都大学 生存圏研究所
教授 五十田 博 氏

はじめに

京都大学の五十田です。現在、生存圏研究所というところに所属していますが、この研究所は世界に唯一で、15年ほど前に宇宙や大気の研究と木材の研究をつなぎ、融合した研究機関として誕生しました。現在の私の中心的課題は、経験と勘がこれまで重要視されてきた木材や木材を用いた構造物の研究です。宇宙や大気に関する研究も自然が相手です。それらを評価するうえで、例えば信頼性工学などが用いられがちです。これは木材の評価にも通ずるところがあり、手法自体は共通すると思っています。経験とか勘というと、とかくローテクと思われがちですが、最近のクロスラミネティッドディンバーの構造設計法などの例を示すまでもなく、木造であっても鉄筋コンクリート構造や鉄骨造でも使わないような極めて先端的な手法が使われ、そして、研究レベルもそれらの構造に追いつこうと実験、解析が重ねられています。

さて、本日は「住宅の地震被害と耐震」というお題を事務局の方からいただきました。2016年に発生した熊本地震の地震被害からわかったこと、さらに、熊本地震では地震の2年後に調査を実施し、2年後調査からもわかったこと、があります。それらの調査を踏まえ、新築住宅の設計、既存住宅の耐震補強についての方向性がみえたような気がしています。そのことについて、お話をさせていただきます。なお、私の主たる対象は木造住宅です。多少の違いはあるものの、建築基準法の最低の要求性能は鉄筋コンクリート造や鉄骨造と同じです。よって、本日の話は、鉄筋コンクリート造や鉄骨造にも適用できるものと考えています。特に鉄骨造は、建物の軽さ、設計と実性能の関係など木造住宅と似通ったところが多く、今日の話はほぼそのまま鉄骨造に通じるとと思っています。

また、木材を利用した建築物の最新の話題を多少の時間をいただいてさせていただくことをお許しください。ハイテクセミナーと銘打った、せっかくの

機会ですので、追加をさせていただきます。

住宅の地震被害

熊本地震直後に被害の大きかった益城町の中心部で悉皆調査を実施しました。この調査は国土交通省と日本建築学会が協力して実施したものです。図1は100m×100mの区画内の倒壊率を示したもので、緑色が倒壊率ゼロ、そして黄色、赤、と色が濃くなると倒壊率が25%ずつ大きくなり、茶色の部分が75%以上の倒壊率です。倒壊率75%の地域がいくつかあります。そして、次の図は被害を建築年によって分けたものです。建築年は建築基準法が変わった時として、1981年のいわゆる新耐震をひとつめの区切り、木造では1995年兵庫県南部地震の被害を踏まえ、2000年にも告示を明文化していますので、2000年も区切りとしています。1981年の新耐震以前でも無被害の住宅があります。ひとつ前の図で説明した倒壊率の低い地域に建てられたものが大半で、揺れが小さかったから被害が少なかったと考えています。

現行基準である2000年以降でも7棟の倒壊がありました。これについてはのちほど、その原因につ



講師 五十田 博 氏

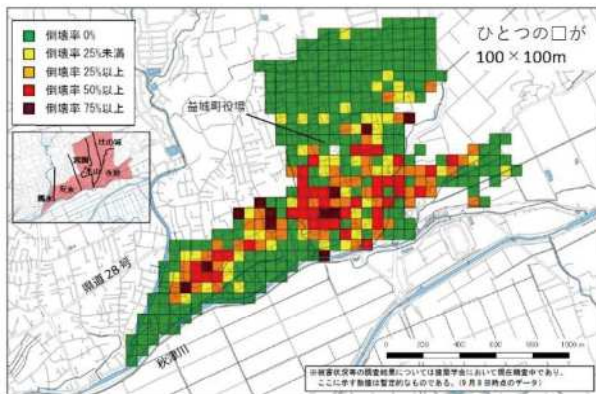


図1 益城町の悉皆調査結果

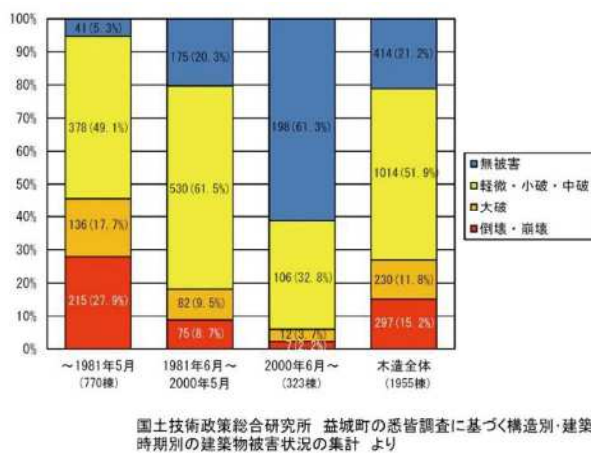


図2 建築年代別の被害程度

いて述べたいと思います。1981年から2000年までの住宅についても倒壊を含む大きな被害が生じています。2000年に告示を明文化する以前の不十分な接合や壁の配置の悪いものが被害を受けていると考えています。新耐震以前は、壁が不足をしています。

さて、2000年以降の建築物で倒壊している7棟の説明です。うち3棟は2000年基準で要求される所定の金物がついてませんでした。つまり法令違反か、確認の時期が法令改正以前ということになりますが、その辺の詳細はわかりません。また、1棟が地盤の崩壊に起因する被害、2棟が法令は守っているものの法令の前提となる条件、例えば、外壁が重かったり、接合部が不十分だったりするものです。最後の1棟についてはその原因がわかりません。つまり、局所的に揺れが強かったものと考えていますが、詳しくは不明です。

さて、接合部に起因する倒壊が4棟ありましたので、地震直後の講演会などでは、接合部設計の重要性について、図や動画を用いて説明しました。例え

ば、木造の接合部の設計では、上下階の壁の配置や壁の強さによって、必要な接合部の性能が決まりますが、その際、計算上の留意点を説明しています。例えば、図3は築3年で倒壊してしまった住宅の振動の途中の解析結果です。接合部がはずれています。接合部がはずれないものは、倒壊に至らないことがわかっています。接合部以外にも、構造計画の基本となる壁のバランス、例えば、南面に開口部が大きくとられ、ねじれやすい住宅についても、図4のように模型などを用いて説明しました。加えて、建築基準法が担保しようとしている性能が過去最大級の地震に対して倒壊をしないことであって、損傷を防ぐことや余震に対する安全性などは目指していないこと、なども説明しました。また、熊本地震の2年後に、悉皆調査を実施した益城町中心部の建物の復旧調査をおこないました。目的は、地震被害の程度



図3 保有耐力接合されていない接合部

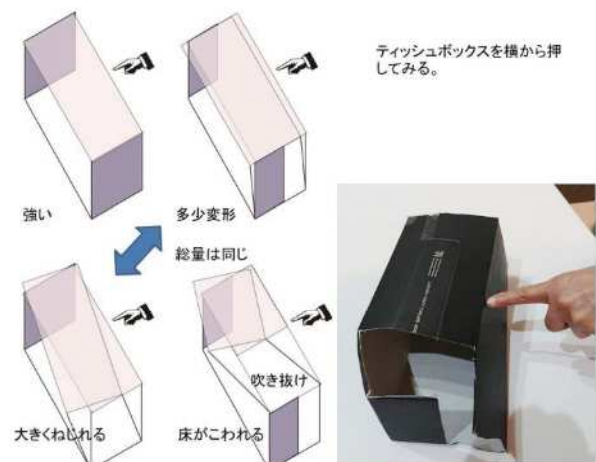


図4 バランスよい配置、壁を増やせば問題軽減

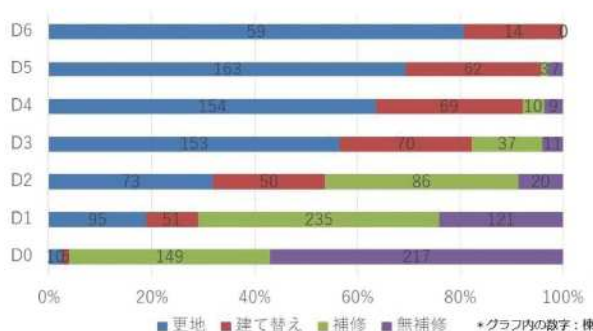
熊本地震復旧調査 2018年4月16日、17日



予想よりも多くの家が建て替わっている!!!

図5-1 熊本地震復旧調査

木造建物の2年後の状況



一部損壊の住宅の半分が建て替えに!

図5-2 熊本地震2年後の調査

と建て替えや修復の実態を関連付けようというものです。結果は、全壊した住宅の大半が取り壊されることは予想通りでしたが、外観上一部損壊のレベルであってもそのうちの約半数の住宅が取り壊されるという結果になり、被害の程度を少なくとも一部損壊以下に抑えないといけない、というものでした。

さて、このようなことを地震直後、あるいは2年後までの講習会で話をしてきました。ただ、講習会の後には「結局どうすればいいのか?」という声をよく聞きました。

そこで、このような設計上配慮すべき細かい説明は省略し、2つの大きな提案をし、そして、具体的方法を示すことにしました。

まず、新築の住宅の耐震設計をどうするか? 目標は、激震地にあったとしても継続使用できる住宅です。具体的方法は「耐震壁の量を2倍にしよう!」というものです。さらに、設計者に対してそのことを印象付けるため「設計をやめれば高い耐震性能が確保できる」と提案をしました。具体例を示します。図6は住宅性能表示制度の勉強会で使用した1階平面図です。この住宅で耐震等級3が実現できるか?

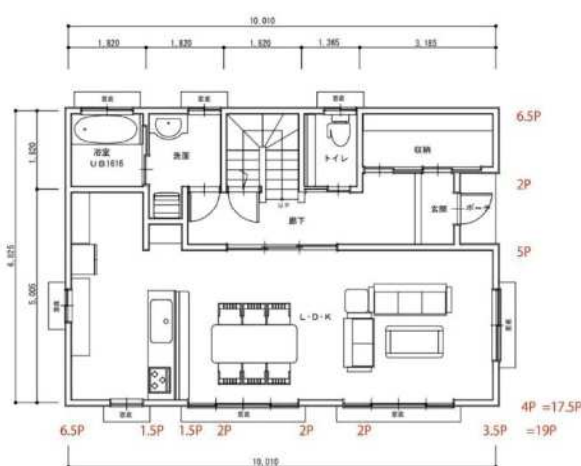


図6 無開口壁をカウント

というのが課題です。まず、無開口壁の全体量を数えます。X方向が17.5P、Y方向が19Pあります。仮に平面的にも立面的にもバランスの良い壁の配置を無視し、単純にすべての無開口壁を耐力壁とします。そうした場合、いくつの壁倍率とすると基準法を満たすか? 耐震等級2を満たすか、耐震等級3を満たすか、それぞれに必要な壁倍率を求めました。結果、1.21倍、1.88倍、2.26倍という答えになりました。基準法を満足したいなら、1.5倍の三つ割の片すじかい、耐震等級2は二つ割の片すじかい、耐震等級3は2.5倍の構造用合板をすべての無開口壁に張れば実現できます。仮にせっこうボードなどは仕上げて使われますので、それを倍率のあるものとすれば、基準法レベルはほとんどすじかいなしでも実現できます。平面的な釣り合いの良さは、いわゆる建物周辺の四分割された部分の壁の充足率で検討します。これを満足しようとするとおのずと外周部に壁の強いものを配置することになります。仮に外周部だけを強くするとし、構造用合板の2.5倍と断熱材のことをあまり考えず、片すじかいの2倍を外周に配置することになると、外周部だけで基準法レベルの2倍が実現できます。このように住宅の図面をいくつか集め、無開口壁をすべて耐力壁としたらどうなるか、ということを検討してみました。その結果は、ほぼ同様で、すべての無開口壁に構造用合板を張ると基準法の2倍程度の壁の量が確保できる、外周部に強い壁を持ってくれば釣り合いの良い配置もOKになるということです。さて、この話をするとそんなことをするとねじれてしまうという

話をよく聞きます。南側に3Pしか壁を設置できないのであれば、北面も3Pと設計したいというものです、そうなのですが、充足率1.0は満足しているので、ねじれたとしても絶対値は大きくありません。必要量が3P、3Pのところ、片側は補強して6Pとした、さらに、直交壁も所要量以上に入っていてねじれに抵抗できる、さらに床も厚物合板にして剛床が成立するようにした。としたらどうでしょうか？3P×3Pよりも3P×6Pの住宅の応答変形は小さくなります。確かにねじれるかもしれませんが、その量はわずかだということです。ねじれない住宅は、必要最小限の壁の量で設計した場合にはそうかもしれませんが、最小限でない場合には多少のねじれは構わないということです。逆の言い方をしますと、必要最小限の壁の量として住宅の壁を決め、壁の釣り合いが悪かった。その住宅は倒壊に至る可能性があります。ということです。一方、壁の量を2倍にした住宅で壁の釣り合いが悪かった。壁は釣り合いが悪くねじれたけれど、壁の量が多く変形量が小さいので倒壊に至らないということです。

振動実験を見ていただきます。北面に壁が多く、南面には壁が少ない建物です。こんな建物であっても必要量が2倍あれば、熊本地震の本震に対して、応答変形は20mm程度におさまることがわかります。

熊本地震の直後に住宅のプラン分析をしました。その結果、外周部の壁に倍率の高いものを使い、充足率1.0を満足するように設計をしている住宅が多くあることがわかりました。この外周部に倍率の高いものを使うというのを、あまりプランとは関係なく、機械的にやろうとしているからか、極めて性能の良い壁が外周部に使われていることが多いとわかりました。つまり、いつも高倍率を外周部に使ってしまう、プランの変更なしに壁の釣り合いの良い配置が満足されるということです。営業の段階で作っているプランが構造の検討段階で変更になると営業としてはやりにくいので、そういう意図はよく理解できます。そうすると何が起こるか？平面上内部に壁がなくとも基準法を満足する、耐震等級2や3であっても内部の壁は強い耐力壁とせずともよいということが起こります。基準上いらないので、内部は耐力壁となりません。そうすると、図8のように大きな空間がとられる部分で、途中で支える壁が少なくなると、床に過大な変形が生じるわけです。設



熊本本震 20mm

図7 壁量2倍を振動台実験で性能確認

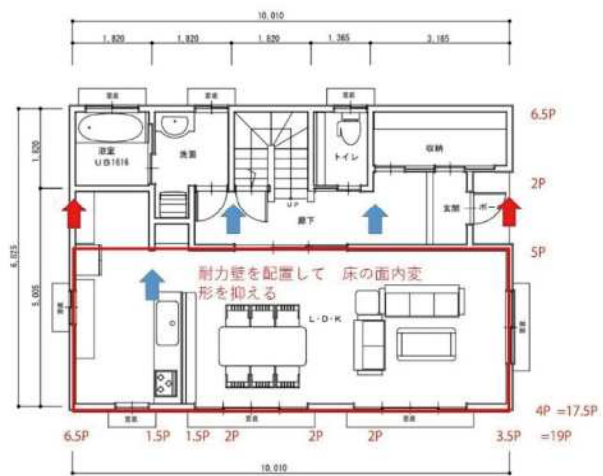


図8 外周部だけではなく、内部も耐力壁に

計という行為＝基準法を守ることと考えるあまり、基準法では想定していないような危険なことが生じています。ここでも設計をやめて、すべての壁を耐力壁にしようとするれば、壁量が2.0倍くらいになって危険な建物はできなくなります。

すべてを耐力壁にしたらお金がかかるのではないかとと思われるかもしれませんが、すべての壁を耐力壁としても基礎に過大な力が加わるわけではないので、基礎の費用はほとんど変わりません。耐震壁の費用は増えますが、もともと無開口壁で仕上げがされている壁ですから、すじかいや合板の材料費が多少増え、接合金物が増えたとしても5～10万円程度と聞いています。仮にその倍だとしても20万円です。それで損傷の小さい住宅、地震後も継続して住める住宅ができるのであれば安いものとも思います。

そんな実際には難しいという方がまだまだおられるかもしれません。枠組壁工法の無開口壁は基本的に構造用合板などを張って耐力壁としています。

枠組壁工法ではできているわけですが、なぜ軸組構法できないのでしょうか？熊本地震の後の枠組壁工法の自社の被災状況を調べたメーカーさんがいましたが、正確に計算したわけではありませんが、壁量の充足率は2倍を超えているものが数多くありました。一見して平均は2倍を超えているのではという印象です。わざわざ設計という行為で耐震性能を下げているのが軸組構法と現在では言わざるを得ないような状況です。壁量が2倍あるなら、ねじれ、接合部の設計、など構造計画にさほど気を使わなくとも安全、安心な家ができます。やることは無開口壁をすべて耐力壁にすることです。そして、四分割法の充足率を1.0とすること。さらに厚物合板を使った剛床です。もちろん、壁量を2倍にしてねじれ、接合部の設計など構造計画がよければもっと性能のよい住宅ができます。これが新築で今後進めていきたいことです。

次いで、既存住宅の耐震化について話をします。既存の住宅は、激震地にあっても倒壊をしない、激震地から離れていたなら継続使用できる住宅をつくることです。その具体的な方法は、補強設計して、基準法の最低性能を実現できるようにすること、です。当たり前のことですが、なかなか実現の難しいところでもあります。耐震補強の場合、同じ評点だとしてもその数値が算出される過程は異なります。例えば、評点が同じ0.7だとしても、壁量が不足している場合、壁量は足りているが壁の釣り合いが悪い場合や接合部が耐力壁の強さに対して不十分な場合、などいくつかの理由が考えられます。その弱点を見つけだし、適切な補強を施すことによって評点1.0以上にすることが重要ということです。既存の補強は頭を使わねばなりません。プログラムを使っていくつかの補強を試してみても評点が1.0を超えたのがこの方法だった。だからそれを補強として採用した、ではだめなのです。まず、弱点を耐震診断で明らかにし、それに対応した補強計画を立てるということです。木造以外の構造では1981年以前の建物は耐震新診断をして必要に応じて補強、1981年以降は耐震性が確保されていると、いわれることが多いです。木造の場合、1981年以前は耐震性が不足しているので補強、診断を省略して補強を進めてほしい、1981年から2000年までは接合部が不十分なものがあるので、耐震診断をして補強の要否を判断してほ



図9 在来軸組構法と枠組壁工法の違い

すでにものが与えられている新たに始める新築
とは大きく異なる！！

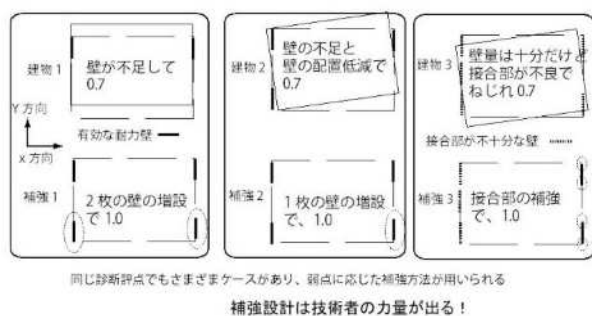


図10 耐震補強は同じ評点でも違いがある

しいと思っています。

お施主さんに対して補強を促すために、補強の費用対効果とか、啓発用パンフレット、1981年から2000年までの住宅に対して簡単に診断をできるよう「木造住宅耐震性能検証法」なども用意があります。それらを活用いただければと思います。地震時に人命を失っているのは実は既存の住宅に住まれている方々です。補強を進める、新築に改修する、ということを推進しない限り、地震被害は繰り返されてしまいます。住宅の安全という観点からは既存住宅の耐震補強が重要です。

さて、残った時間で「高層ビルを木で建てる」話を多少させていただければと思います。

世界では10年ほど前に10階建て程度の木造建築物が建ったと話題になりましたが、現在は、19階建て（カナダバンクーバー）、24階建て（オーストラリアウイーン）などが建っています。カナダバンクーバーは地震が起こる地域で鉄筋コンクリート造のコアで地震力を負担し、木造は柱とはりに使われています。19階建てでは木材は被覆されますが、図11の

ように8階建て程度ですと、柱はり床などは被覆がなく、木造らしい建物として仕上がっています。この建物は米国オレゴン州ポートランドにあります。これらの中高層木造建築を実現できたのはCLTをはじめとするマスティンバーと呼ばれる木材が開発されたからです。また、各国で木材が使われるのは、永続的に供給可能な資源で、かつ成長中には二酸化炭素を吸収し、供用期間中にはその炭素を排出せずに固定化する環境にやさしい資源循環材料だからです。

日本でもそのような低炭素社会の構築のために木材を有効利用する、さらに戦後に植林した木材が利用期にあるということで、建築物への木材の利用が国をあげて進められています。そのひとつの動きがCLTの告示が平成28年度に施行で、CLTを使った建築物が建つようになりました。ただし、主流となる高さは3階建て程度にとどまり、まだまだ高さでは欧米並みというわけにはいきません。日本では地震後の火災について細心の注意が必要でこれらの国々よりも防耐火の規定が厳しい状況にあります。このような日本であって中高層建築物に木材を利用する方法として鉄骨造や鉄筋コンクリート造の耐震壁として木材を利用する研究を進めています。鉄筋コンクリート造の耐震壁と同程度の耐力が確保できることがわかりつつあります。まだまだ、日本における中高層建築物への木材利用は始まったばかりで、機会があればまた紹介したいと思います。

以上で本日の私の話を終わりにします。ご清聴どうもありがとうございました。



図11 8階建ての木造建物

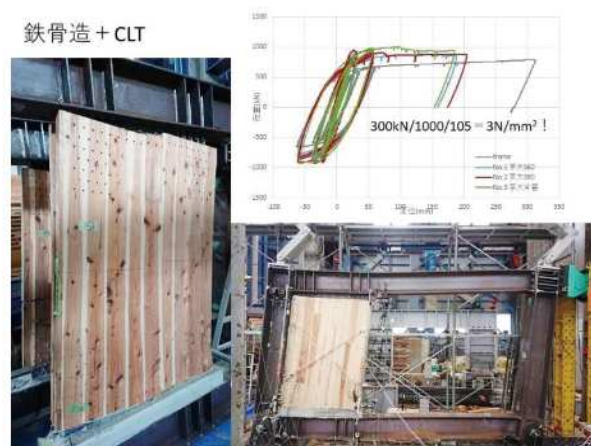


図12 鉄骨造にCLT耐震壁を用いた実験

