

# 「総持ち」の伝統木造建物を健全に耐震補強するために

京都大学大学院教授 林 康裕

## 1. 総持ち

伝統木造建物は、総持ちであるとよく言われる。総持ちは、一つ一つの部材が役目を果たし、全体として地震力に対して抵抗する様子を表している。架構を構成する部材や接合部は、大きな抵抗力を発揮することはできない。逆に、接合部にめり込みが生じることで大きな力を伝達しないですむことで、各部材には大きな力が作用せず、致命的な損傷が生じにくくなっている。このため、大きな変形が生じても倒壊を免れることが可能となる。伝統木造建物は、変形性能が高い構造物であると言われる所以である。

## 2. 限界耐力計算

限界耐力計算は、伝統木造建物の変形性能を活かすことができる設計法と言われている。解析モデルを1自由度系に縮約して応答スペクトル法を適用することで、最大応答変形角が限界変形角以下であることを確認できる。伝統木造建物の限界変形角は大きいですが、 $1/30\text{rad}$  や $1/15\text{rad}$  などに設定されることが多いので、どうしても耐力増大や剛性増大の方向に耐震補強を誘導する傾向にある。後述のように、注意する必要がある。

限界耐力計算は、大きく2種類に分けられる。京町家や民家の耐震診断で用いられる方法は「簡易な方法」<sup>1)</sup>で、所謂、串団子モデルを用い、各階の復元力特性を構造要素の復元力特性を単純累加して求めている。構造解析に詳しくない設計者でも用いることができる点に特徴がある。しかし、単純累加できるということは、力の流れを考慮しないで設計するため、総持ちの状態が崩れていても全く気づきもしない。つまり、設計者が耐震性を向上させようと努力するのだが、意図せず総持ちの状態を崩してしまい、逆に耐震性を低下させてしまう可能性を秘めている。耐震診断には経費がかからないし、行政担当者でも比較的容易に理解できるし、構造計算適合性判定を受けやすいなどの理由から、文化財建造物にも適用されて、不必要・不合理な耐震補強を実施してしまっている事例を多く見かける。

これに対して、文化財建造物で、予算のとれる場合には、全ての部材を3次元でモデル化した上で、各層の復元力特性を求める「詳細な方法」が用いられる。詳細なモデル化を行っているのだが、意外と上記の簡易な方法で考慮されていることが考慮されていない。例えば、簡易な方法でも鴨居の引抜けは考慮されるが、詳細な方法では考慮されることは

殆どない。また、市販の一貫プログラムが使われるとはいえ、高度なモデル化の知識が必要となり、解析者の知識や能力によって解析結果には大きな差が出てしまう。簡単な2層1スパンの架構を対象に、第一線の構造設計者にブラインド解析をしていただいたところ、耐力には2～3割以上の差が出てしまい（図1）、損傷箇所にも差が見られた<sup>2)</sup>。用いた計算仮定やモデル化が妥当か、計算結果が妥当かをしっかりと確認する必要がある。

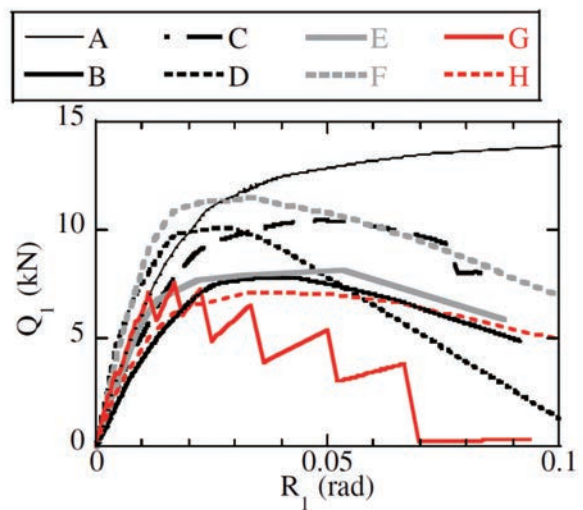
### 3. 地盤の増幅率

伝統構法の耐震安全性には、地盤の地震動増幅効果の影響が極めて大きく影響を及ぼす。丘陵地や山際に立てられた建物では、建設当時の切り盛りに起因して、地盤の沈下によって建物が傾斜し、所有者が耐震安全性を心配されることも多い。地滑り、斜面崩壊などにも注意する必要があるが、建物への入力地震動は大きく低減され、倒壊の危険性は比較的高くない。これに対して、堆積地盤が深い場所に立地する伝統木造建物は、十分な注意を要する。

1596年慶長伏見地震では、甚大な被害を被った東寺と仁王門以外倒壊被害が報告されていない東福寺とでは、被害に顕著な差が生じた。この差は、京都盆地の深い堆積地盤構造に関係して、縁辺部と中央付近の地震動増幅特性に大きな差があったことが原因と考えられる<sup>3)</sup>。ただ、深い堆積地盤構造に起因した地震動増幅特性を、設計で考慮することは一



(a) 試験体外観（頂部の静的水平加力）



(b) 8機関による解析結果（1階の復元力特性）

図1 京町家試験体のブラインド解析

般的でない。京都市の2003年第3次地震被害想定<sup>4)</sup>における花折断層帯の予測地震動(図2)は、深い堆積地盤構造が考慮されており、文化財の耐震診断で活用されている。しかし、被害想定では、盆地東縁辺部の堆積地盤構造が正しく設定されておらず、予測地震動が大きめに評価されている。東福寺は、1662年の寛文近江・若狭地震や1830年の文政地震でも倒壊被害は報告されていないが、被害想定予測地震動に対しては、倒壊被害が発生してもおかしくない。つまり、現状では、鴨川よりも東側の京都盆地の東縁辺部に建つ文化財建造物にとって、必要以上の耐震補強が要求されているようだ。逆に、盆地中央部では、想定した地震の断層破壊メカニズムや伝播特性に起因して、京都府庁や京都市役所付近など、地震動伝播に起因した干渉縞が現れ、明らかに小さめに予想されている場所がある。このような地点では、より安全性を確保した設計が望まれる。地震被害想定結果の活用方法には、改善すべき点が残されている。

一方、限界耐力計算では、表層地盤の増幅効果が考慮される。ただし、京都市域の伝統構法建物にとっては、必要以上に安全側の評価となっている。特に、簡略法で第2種地盤として評価した場合には、過大な地盤増幅率となるため、タワーマンションでも考慮されていないような地震動となり、診断結果は絶望的な結果となる<sup>5)</sup>。京町家の耐震診断で用

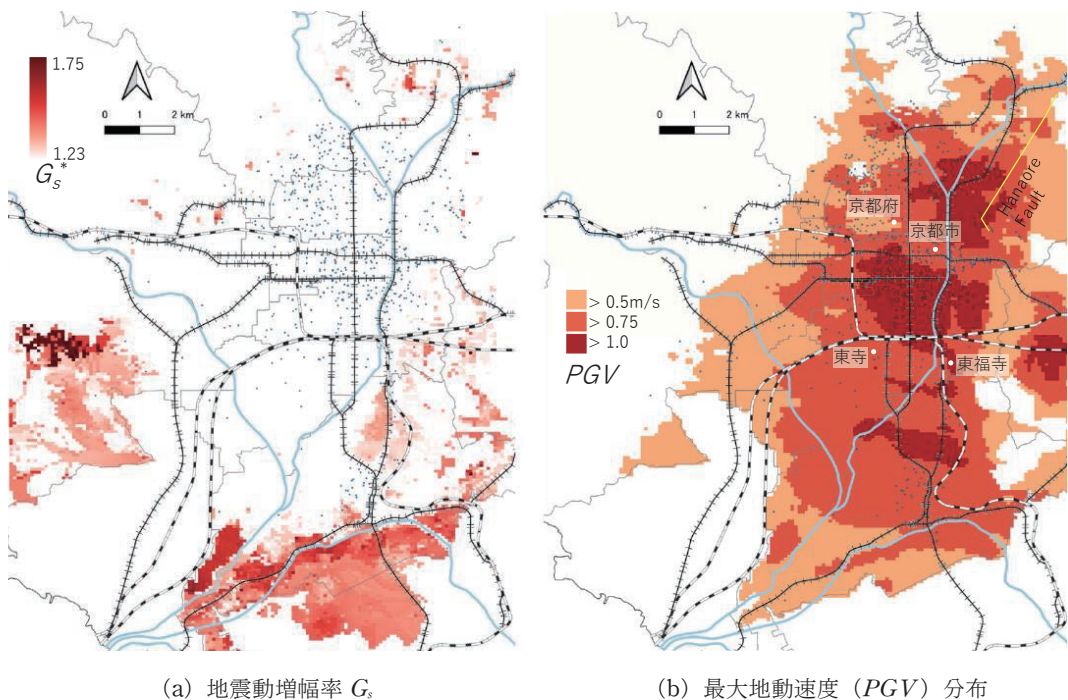


図2 第3次京都市地震被害予測に基づく地盤増幅率と予測地震動

いられている地盤増幅率は、精算法に基づいて設定されているが、用いた地盤データが京都市域の極めて良好な地盤環境を全く反映していないことから、やはり過大な地盤増幅率が設定されている<sup>6)</sup>。京都市内であれば、精算法を用いることで地盤増幅率は下限値の1.23とできる。PS 検層を行うことが望ましいが、設計コストが高くなってしまう。依頼者の予算が限られる場合には、筆者らが提案する略算法<sup>7)</sup>を用いれば、手計算で、下限値である1.23を使って良いことを確認できる。

#### 4. パルス性地震動に対する補強方針

内陸地殻内地震は、全国どこでも発生する可能性がある。特に、太平洋から遠く離れた京都市では、よほど地盤が良くない地点を除いて、内陸地殻内地震だけを念頭に対策を考えればよかろう。内陸地殻内地震では、震源近傍でパルス性の地震動を考慮することとなる。伝統木造建物は、耐力が高く無いので、大地震時下に大きな変形を生じやすい(図3)。パルス性地震動に対しては、地面の動きについていけず、最大地動変位に相当する変形が建物に生ずることとなる。建物の変形量は、少々の耐力増加では劇的な減少は望めず、逆に増大する場合もある。

例えば、花折断層帯地震の予測地震動では、最大で0.4m程度の最大地動変位 (PGD) を想定している。図3に示すように、変位応答スペクトルの振幅も、長周期側では周期によらず0.4m程度で、伝統木造建物には0.4m程度の変位が生じることになる。例えば、2階建ての京町家や高い伝統木造建物では、0.4mの変形に耐えられれば倒壊を免れること

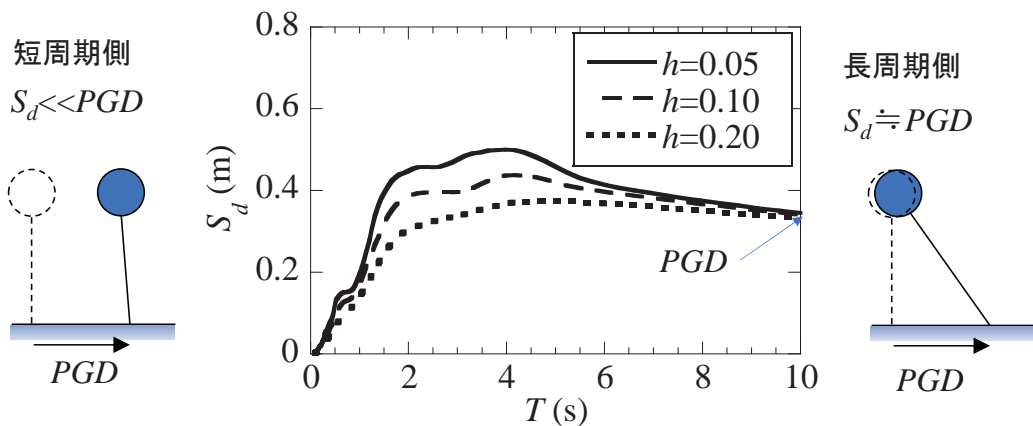


図3 花折断層帯地震の平均的変位応答スペクトル (PGV>1m/s)

ができる。もちろん、地盤の良好な盆地縁辺部では、最大地動変位は小さくなり、伝統木造建物にとっては楽になる。五重塔のような高い構造物の場合には、0.4mの変形が生じて、高さが40mあれば変形角は1/100rad.程度となり、変形性能の高い伝統木造建物なら無理なく倒壊を免れる。軒高が10mのお堂であれば、1/25radの変形が生じてても良いようにすれば良い。2階建ての京町家であっても、1階と2階の変形が均等化するように、土壁を連層化するなどに配慮すればよい。1階と2階の変形を均等化する場合には、構造要素の配置に注意して、力の流れや全体の変形性状に気を配る必要がある。

## 5. 耐震補強上の注意点

耐震補強計画を考える上で、注意いただきたい点について述べたい。

1つめは、ダンパーの増設である。パルス性地震動に対しては、短い継続時間中に、ダンパーによるエネルギー吸収によって最大応答変形量の低減は期待できない。困ったことに、限界耐力計算の場合には、パルス性地震動に対しては、ダンパーの効果を過大評価する計算方法となっている。計算上効くという結果が得られても、パルス性地震動には効かないと考えておいた方が賢明である。また、土壁の増設とダンパーの設置を両方とも行う、あるいは、壁が比較的多い建物にダンパーを設置しようとする事例を見かける。しかし、ダンパーを効かせるには、ダンパーが大きく作動する必要があるが、壁が多いとダンパーの変形は抑制されてしまう。つまり、壁とダンパーは両立しない。

変形性能を阻害する補強を避ける必要がある。例えば、柱脚部に筋交いを入れてしまうと(図3)、耐力や剛性は増加するかもしれないが、変形性能は低下させてしまう。パルス性地震動に対しては、最大地動変位に相当する変形が生じてしまうことを考えれば、柱を折れやすくして倒壊危険度を増加させていることがわかる。パルス性地震動に対しては、思い切って「部分的に補強(耐力や剛性を上昇させて)して変形を低減させようとする考え方をやめる」必要がある。少々の補強では、むしろ変形が増大してしまう場合もあることをご存知だろうか?補強をすることで、地震動の卓越周期(パルス周期)に近づき、変形が増大してしまうのだ。

もう一つ例をあげてみよう。例えば、並列する4構面を有する建物について、中央の2構面が垂壁付き独立柱であったため、柱の曲げ折れを防止するように鉛直構面の補強を計画したとしよう(図4)。すると、中央の2構面が地動に追従して変形が抑えられるが、両側の鉛直構面は地動に追従できず大きく変形してしまう。このために、両側の鉛直構面だけでなく、水平構面にも大きな変形が生じてしまうので、これらを防止するために、水平構面に筋交いを入れるなどの補強が必要になってしまう。補強が補強を生んでいること

になりかねない。しかも、パルス性地震動に対しては、最大地動変位に相当する変形が生じてしまう傾向は大きく変わるものではないので、最大変形量の低減はわずかとなる。

前述のように、抜本的な補強を行えば変形も抑制できるが、もはや伝統構法の木造建物とは言い難い。文化財的価値を犠牲にし、耐震対策コストも犠牲にするのであるから、総持ちの考え方を活かした補強法を優先していただきたい。むしろ、思い切って、無理な補強は行わないという選択肢も視野に入れるべきかもしれない。

何度も繰り返しになるが、総持ちは、すべての部材が助け合っていることを忘れてはいけない。蟻害や腐朽による生物劣化は、単にその部材が痛んだだけでは済まされない。架構全体に影響を及ぼしかねないことを意味している。補修方法の選定においては、総持ち

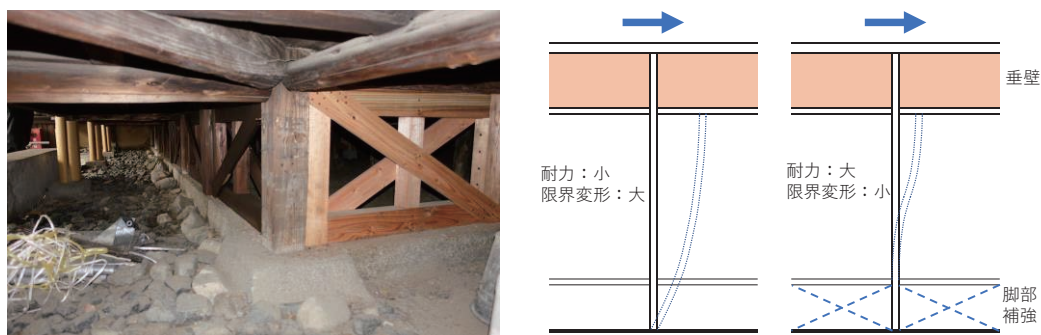


図4 脚部補強の効果

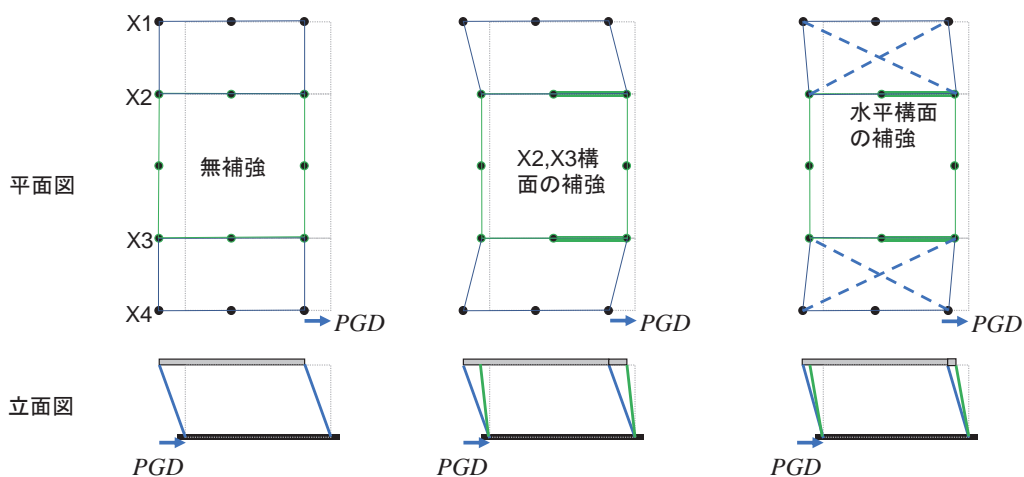


図5 1層4構面における鉛直構面の耐震補強

の状態を大きく崩さず、維持できるかどうかを確認することが重要である。また、石場建てでも、個々の柱脚の回転変形や浮上りを拘束しないことで、高い変形性能が実現されている。柱脚を拘束することは逆効果である。ただし、個々の柱脚がバラバラに歩いて動くことは避けなければならない。お互いの相対的な水平変形を止めるような足固めは有効である。ただし、回転は拘束すると逆効果となることがある。全体的な滑りは心配しなくてよい。総持ちの伝統木造建物は、全体的に滑れるほど耐力は高くない。ただし、総持ちを崩すような補強や床の水平剛性を高めるような補強を実施してしまうと、柱脚まで拘束しなくてはならなくなる場合がある。

## 6. 最後に

最後に、地震荷重や設計クライテリアは、人間が決めたルールに過ぎない。地震荷重は、1981年の新耐震設計法や2000年の建築基準法の改正（あるいは、限界耐力計算の設定）は、たかだか40年の歴史をもった設計ルールに過ぎない。本格的なデジタル強震観測の歴史も、40年足らずである。地震や文化財の歴史は、及びもつかない歴史を持っている。現行の設計のルールや慣習に身を委ねたり、頼りにするのは適切ではない。伝統木造建物を後世に伝えるには、伝統木造建物に関わる人々の意識の持ち方が最も重要である。そして、後世に評価されることを念頭に、恥ずかしくない伝統木造文化の1ページを残すという想いで取り組みたいものである。

### （参考文献）

- 1) 伝統的構法木造建築物設計マニュアル編集委員会：伝統的構法のための木造耐震設計法：石場建てを含む木造建築物の耐震設計・耐震補強マニュアル、2019. 6.
- 2) 白井嵩人、符栄吉、笈田彬長、生路有美子、青木和雄、杉野未奈、林康裕：2階建て京町家試験体の静的水平加力実験のブラインド解析（その1、2）、日本建築学会大会梗概集、構造Ⅲ、pp.279-282、2022. 9.
- 3) 吉川峻平、高石響平、杉野未奈、鶴岡典慶、林康裕：1596年慶長伏見地震における東福寺の被害に関する分析（その1～3）、日本建築学会大会梗概集、構造Ⅲ、pp.557-562、2022. 9.
- 4) 京都市：京都市第3次地震被害想定報告書、2003. 10.
- 5) 林康裕、杉野未奈、符栄吉、中嶋伸也、田中和樹：告示スペクトルを用いた耐震設計の疑問点、日本建築学会近畿支部耐震構造研究会シンポジウム、pp.27-35、2021年3月.
- 6) 林康裕、杉野未奈：京都市域の耐震設計のための表層地盤増幅率評価、日本建築学会技術報告集、Vol.28、No.70、pp.1142-1147、2022年10月.
- 7) 林康裕、杉野未奈、田中和樹：京町家の地震荷重の提案、日本建築学会技術報告集、Vol.28、No.70、pp.1148-1153、2022年10月.