

「土」からみる木構造

第5回

茶室の耐震性を巡って

西澤英和 | 関西大学 名誉教授



はじめに

兵庫県南部地震の木造被害を振り返って

関西で伝統的な木造住宅が激減し始めたのはいうまでもなく平成7(1995)年兵庫県南部地震以降。理由はいくつかあろうが、この地震によって、伝統木造建築の信頼が大きく損なわれたことが要因と考えてまず間違いない。

思い返すと、地震直後、一部の木造学者は屋根が重く、土壁が脆弱な伝統木造は欠陥建築であると執拗に主張した。そして緊急事態の混乱下、大規模に展開された伝統木造へのネガティブ・キャンペーンは燎原の火の如く、打ち拉がれた多数の被災者に浸透。伝統的な木造建築への不信感が深く刷り込まれた結果、ほとんど被害を受けていない民家や町家までもが次々と公費解体され、大工、左官をはじめ多くの技能者は非難の的となり、瓦製造をはじめとする地場産業は廃業に追い込まれた。

しかしながら、震災直後の被害状況が把握できていない段階で、早々と論拠不明の過激な主張が喧伝されたのは誠に不可解。結論からいえば直後に流布された「伝統木造には耐震性がない」とか、「瓦が悪い、土壁が悪い」となどの主張を裏付けるような証拠は見つからない。今回の事態は前もって周到に準備されていた「Shock doctrine」が意図的に発動されたのではないかと、そんな穿った見方もあるようだ。

確かに平成7(1995)年1月17日の早朝神戸市とその周辺を突如襲った震度7の激しさは驚くべきものであった。神戸海洋気象台の地盤加速度は南北818gal、東西618gal。さらに332galもの上下動が重なった。わが国の建物は200gal-0.2Gの水平動に耐えるように——言い換えると弾性限度内に収まるように耐震設計されてきたが、直下型地震の揺れは4倍以上も激烈で、設計上考慮されていない上下動が加わった。

被害は全壊家屋約8万棟、半壊6.2万棟、全壊率が世帯数の

10%を超えるなど異常な値に達し、犠牲者は6千名を超えた。ほとんどは木造家屋の倒壊による圧死という。

さらに人命救助と緊急復旧を最優先すべき発災後数週間の「Emergency」の時期に、突然FEMA(連邦危機管理局・Federal Emergency Management Agency)の「応急危険度判定」を強行したことが、混乱に一層拍車をかけた。

あれから約30年。今なお多くの人は「伝統木造は欠陥建築である!」、あるいは「大工から鑿を奪え! 鉋を奪え!」などの過激なpropagandaを信じているが、このような怪しげな「都市伝説」はそもそも成り立たない。

伝統木造は存在したのか?

この直下型地震での木造家屋の大被害を考える際、神戸は典型的な戦災都市であるという歴史的事実を踏まえないといけない。第二次大戦末期、米軍は昭和20(1945)年2月4日以来、128回もの無差別絨毯爆撃を繰り返した結果、神戸は写真1のように一面の焼け野原と化した【写真1】。今では想像もできないが、神戸では「伝統木造」はほぼ完全に焼失し、戦後焼土と化した街に再建されたの



写真1 大空襲で焦土と化した神戸の市街地(米軍提供)

表1 歴史的な大地震の推定加速度(距離減衰式は福島・田中式による)

地震名称	和暦	西暦	規模	震央距離(km)	推定加速度(gal)
慶長伏見地震	慶長元年	1956	M7.5	3	580
寛文地震	寛文2年	1662	M7.5	43	220
京都地震	文政13年	1830	M6.5	25	180
奈良地震	安政元年	1854	M7.5	36	220

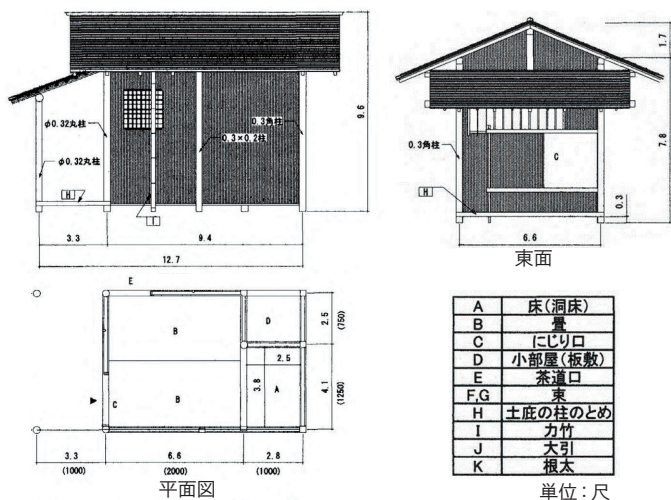
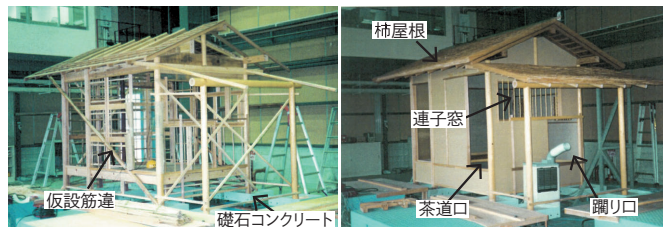


図1 待庵写しの基本図

は、San Francisco 講和条約締結後に施行された「建築基準法」や「住宅金融公庫仕様」に基づく「戦後木造」であって、「建基法」や「同施行令」の耐震規定の遵守を絶対条件に木造家屋が大量建設されたのである。土壁で瓦葺きならずして「伝統木造」であるとの浅薄な認識は誤りである。大規模倒壊して夥しい犠牲者を出したのは、耐震の構えが「伝統木造」とはまったく異なる「戦後木造」であったという事実は極めて重い。神戸地震の大被害の責任を存在もしなかった「伝統木造」に転嫁することによって、「戦後木造」が内包する深刻な耐震上の問題を糊塗するような propaganda は倫理的にも許されまい。

「国宝妙喜庵待庵写し」の激震シミュレーション実験

あの頃、伝統木造への風当たりは日増しに強く、遂に「お茶室」は危険だとの風評に接するに及んで、「何とかかなりまへんやろか?」との相談が寄せられるようになった。もっとも茶室についてはまったくの素人。難しいことを聞かれても答えようがない。しかしながら、度重なる大地震に耐えた名席が遺存していることを思えば、何事も「論より証拠」。激震で茶室はどのような挙動を示すかこの眼で確かめるのが一番と思った。だが研究費などまったくない。そこで選定技術保持者や伝統建築の先生方をお願いに回ったところ、快く指導いただけることになった。こうして「国宝妙喜庵待庵」を復元すべく学生と私は勤労奉仕に徹し、「絞丸太」や「台杉」、「椀」などの余材を方々から頂き、「全国文化財壁技術保存会」や「全国社寺等屋根技術保存会」の協力のもと技能研修の一環としてプロジェクトが始まった。



木組完了・壁貫、間渡し設置

壁付完了・柿(コケラ)屋根完成

写真2 製作状況

実験目的

他の伝統木造と同じく茶室の柱は基礎に固定されておらず、しかも木柄は繊細で壁厚は薄く、「踊り口」や「給仕口」などを配するため、壁はさほど多くない。特に国宝「待庵」においては天井まで土を塗り込めた「洞床」など、一旦被害を受けると修復が極めて困難な「古式土壁」が保存されているため、激震に待庵は激震に耐えるのか? さらに基礎を固定しない伝統木造は激しい直下型地震動でどう挙動するか? などに注目して、3次元の激震シミュレーションを計画した。

入力地震動と試験体概要

京都府乙訓郡大山崎町に残る「国宝待庵」は千利休により1580年代前半につくられた二畳台目の草庵茶席であるが、慶長元(1596)年の伏見地震(M7.5)、寛文5(1662)年の京都地震(M7.5)、文政13(1830)年の京都地震(M6.5)をはじめ多くの大地震に見舞われているので、過去の大地震の推定最大加速度を算出した結果を表1に示す[表1]。慶長伏見地震の地動は600galに近かったようだ。

図1は待庵の基本図である[図1]。柱は面皮付き3寸角、土庇の柱は径3寸2分、壁厚は平均1寸6分とした。非常に壁厚が薄いため小舞竹などは薄く剥ぎ、さらに壁貫も薬研状に面を取るなど、繊細かつ極めて丁寧な仕事に徹した。なお、茶席の柱は礎石の形状に合わせて柱底を「ひかり付け」るが、実験ではコンクリートの礎石に柱を直接置いている。写真2に示すように振動台上に設置したコンクリートの礎石の上で木組を行い[写真2]、順次土壁や柿屋根を施工した。

入力地震動・測定系

実験には神戸海洋気象台での観測波形(以下JMA神戸波)のNS方向成分を用いた。JMA神戸の観測最大加速度はNS方向に818galであったが、原波形を入力する前に、最大加速度を4分の1の200galおよび2分の1の400galに調整して2回の振動試験を行い、問題がなければ818galの原波形で加振することにした。

ちなみに200gal=0.2Gは震度0.2の短期許容応力度レベルに相当する。源波は最大加速度818galに対して最大速度は約80kineであるため、200gal入力時→約20kine、400gal入力時→40kineとなる。ちなみに20kineという値は関西(当時)のLevel1相当、40kineはLevel2の設計速度に相当する。

図2に測定系を示す[図2]。加速度は振動台上、床面、天井面に

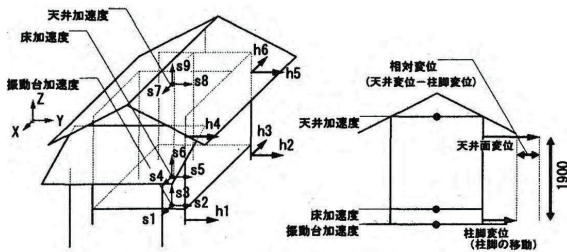


図2 測定系とセンサーの設置計画

表2 エネルギーの計算式

$W_1 = \int_0^t -\dot{y} \cdot \dot{x} dt \dots \text{式(1)}$	$\begin{cases} \dot{y} = \text{入力加速度 } s1 \\ \dot{x} = \text{応答速度 } (s7 \text{を積分}) \end{cases}$
$W_2 = \int_0^t \ddot{x}_{s4} \cdot \Delta x_{h3} dt \dots \text{式(2)}$	$\begin{cases} \ddot{x}_{s4} = \text{床面応答加速度 } s4 \\ \Delta x_{h3} = \text{柱変位増分} \end{cases}$
$W_3 = \int_0^t \ddot{x} \cdot \Delta x_{h6} dt \dots \text{式(3)}$	$\begin{cases} \ddot{x}_{s7} = \text{応答加速度 } s7 \\ x_{h6} = \text{絶対変位 } h6 \end{cases}$
$W_4 = \int_0^t \ddot{x}_{s7} \cdot \Delta x_{h6-h3} dt \dots \text{式(4)}$	$\begin{cases} x_{h6-h3} = \text{層間変位 } (h6 - h3) \end{cases}$

配置した加速度計 (S1～S9) で、変位は柱脚 (h1～h3)、天井面 (h4～h6) に設置したレーザー変位で測定した。また柱移動は柱脚変位計から、層間変位は天井面変位から柱脚の移動量を減じて求めた。試験体は礎石に固定していないので、建物は水平方向へのslip (滑り)、剛心周りのspin (振り回り) のほか、Rocking (浮き上がり) などの3次元運動を生じるが、とりわけslipとrockingが卓越しやすいのでこれに注目した。

多くの耐震研究においては構造体の応答加速度、応答変位、応答速度やそれに対応する復元力の時刻歴を重視するが、今回のような摩擦や衝突を伴う場合にはエネルギー応答についての検討が重要である。このため、実験データから表2の評価式で各種のエネルギー量を算定した [表2]。すなわち加振により試験体に入力される単位質量あたりの総入力エネルギーW1は入力加速度と応答速度の積を時間積分した表2の式(1)から、摩擦消費により消費されるエネルギーW2は床面加速度と柱の移動量の積として式(2)から、絶対変位系から見た履歴消費エネルギーW3は式(3)から、層間変形から見た履歴消費エネルギーW4は式(4)から、さらに上部架構の内部消費エネルギーは(W1-W2)で計算して、各エネルギーの時刻歴をフォローした。

JMA 神戸波入力時の挙動について

■ 200gal 入力実験

桁行方向にNS成分の最大値を200galにした場合の結果を図3に示す [図3]。左上段より入力加速度S1、天井桁行方向の応答加速度S7、基礎の移動量h3で最下段はエネルギーの累積曲線である。左図は天井面応答加速度S7と層間変形量 (柱頭変位h6-柱脚変位h3) で示す復元力特性、右図は基礎の移動量を含む柱頭の絶対変位h6である。200gal入力時の加速度応答倍率はt=13秒付近で1.1倍程度と小さく、基礎移動量も0.3mmほどで建物は基礎にほぼ固着しており、復元力特性はほぼ線形性である。

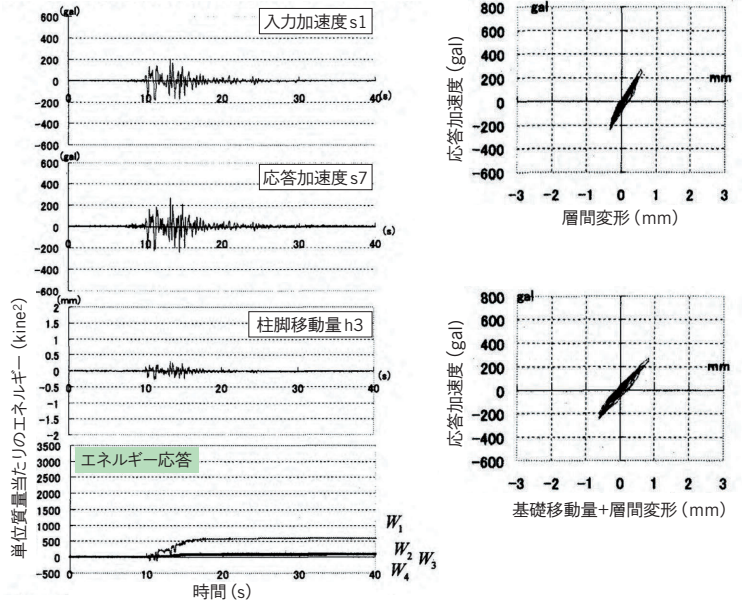


図3 桁行方向200gal入力時の応答

すなわち200gal入力時においては入力S1とS7は基礎が固着しているため、ほぼ同じ値となっており、従って左右の図もほとんど同じである。単位質量当たりのエネルギー-応答の累積値は約650kine²で、その大部分は履歴吸収エネルギーW1が占めている。

■ 400gal 入力時

最大値加速度を200galから400galに2倍に増加させた場合の結果を図4に示す [図4]。これに伴って、柱の水平移動量は7倍の1.5mmに増大し、応答加速度は1.5倍の600galとなった。比例的に増加しないのは、基礎の移動による摩擦エネルギーが消費されるためである。

なお、400gal入力時の累積エネルギーは2,700kine²と200gal入力時の約4倍に増加しており、地動速度によって建物の入力エネルギーを精度よく評価できる。摩擦による累積消費エネルギーW2は1,400kine²で全エネルギーW1の約半分を占める。

■ JMA 神戸源波入力時

200galを1回、400galの地震動を1回入力しただけでは木組は緩まず、洞床や土壁は損傷しなかった。そのため、思い切って818galの加速度を入力したところ、移動量が急増して落下防止用の鉄骨ガードに建物が激しく衝突して測定機材を吹き飛ばしたため、観測不能となった。しかしながら茶室の周囲にスペースがあれば損傷はほとんど生じなかったと判断できた。

水平加速度に着目すると、約200galの水平加速度で滑動し始め、500galで応答加速度は極大に達するが、それ以降、入力加速度を増大させると、逆に応答が減少した。

一般に加速度が増大して、静止摩擦から動摩擦状態に移行すると、図5の「ダルマ落とし」と同じで、摩擦抵抗が急減する [図5]。従って基礎を固定しない建物では、水平加速度が大きいかほど底面剪断力 (base shear) が減少すると考えられ、さらに直下型地震のような激しい上下動が作用すると、水平動は一瞬完全に遮断されるので、大被害を免れる可能性が示唆される。

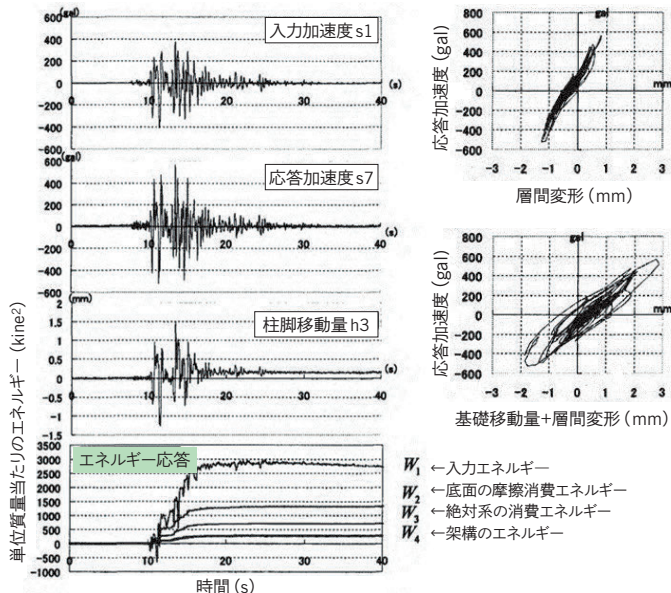


図4 桁行方向400gal入力時の応答

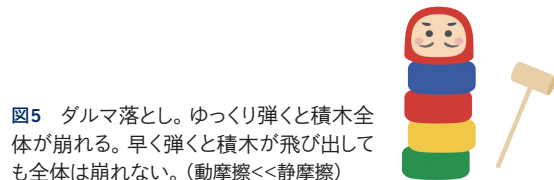


図5 ダルマ落とし。ゆっくり弾くと積木全体が崩れる。早く弾くと積木が飛び出しても全体は崩れない。(動摩擦<<静摩擦)

ギーを消費するという絶妙な「耐震・免震システム」が成り立つからである。いずれにせよ、基礎と上部構造とを緊結しているか否かは、「洋風木造」と「伝統木造」の重要な構造的な相違点であって、闇雲にアンカーを強制することは時に合理性を欠くことは言うまでもない。

ちなみに、耐震設計上、上部架構と基礎を緊結することの是非については多くの議論が知られている。「柔剛論争」を展開した帝国海軍の真島健三博士は、関東大震災での平塚海軍官舎の大規模倒壊は土台を基礎に緊結したことに起因すると指摘し、一貫して木造建築の基礎は固定すべきではないと主張。また、佐野利器・谷口忠両博士も昭和初頭に関東を中心に相次いだ直下型地震——1930年北伊豆地震(M7.5)、1931年西埼玉地震(M7.1)年、さらに1935年静岡地震(M6.5)後の徹底した現地調査結果に基づき、家屋が移動を生じても基礎から墜落しなければ、地震力の一部は土台と基礎の摩擦作用に消費されて上部架構に伝達する量が減ずるとの検証結果に基づき、RC造のべた基礎の上に上部構造を載せて上部構造が30cmほど動く免震基礎を提唱された。

さらに、戦後、昭和23(1948)年の福井地震(M7.1)では、武藤清博士を委員長とする調査特別委員会は、土台と基礎との結合に関連して、地震の勢力が建物に伝わる以前に建物全体が移動することにより、上部構造があまり耐震構造ではなくても被害を免れることを指摘し、坪井善勝博士も60cm以上の移動にも不具合を生じない工法を提案された。

いずれにせよ、上部構造の耐震設計法に関しては、「柔剛」さまざまな立場があるが、木造建築の基礎を固定しない工法の合理性に関しては戦前すでにコンセンサスが得られていたようだ。

にしざわ・ひでかず

1951年大阪府生まれ。1974年京都大学建築学科卒業。1979年同大学院博士課程修了。京都大学講師を経て、関西大学建築学科教授。現在関西大学名誉教授。専門は、耐震工学、鉄骨構造学、文化財構造学など

まとめにかえて —— 柱と土台の固定を巡って

「建基法」では土台と柱は金物やアンカーボルトで緊結しなければならないと定めているが、建基法の基となった戦前の「改正市街地建築物法(物法)」においては、①上部構造を礎石などに載せる手法と、②上部構造をフーチングに固定する手法の2つを使い分けるようになっており、前者は和風木造建築、後者は洋風木造建築が対象であった。

校舎など大スパンで風の受圧面積が大きく、屋根荷重の小さい洋風建築は、日本の激しい台風にはひとたまりもなく倒壊する事例が文明開化以降相次いだ。このため、日本で洋風木造を建設する際にはテントと同じように地盤に固着しなければならないことに気づいた。一方、伝統木造は逆に、屋根を重くして風に抵抗させているのでアンカーはもとより必要としないが、このように基礎を固定しない伝統建築手法は耐震上は非常に好都合。なぜなら基礎の滑動とロッキングを許容することで一瞬リミットを超えた地震入力を自律的に遮断するとともに、構造体を損傷することなく膨大な地震エネルギー

自習型認定研修の設問

設問 1

木造に関する認識で正しいものは次のどれか。

- 戦後神戸の街に再建された木造家屋はすべて「伝統木造」である。
- 「戦後木造」と「伝統木造」は耐震の構えが異なる。
- 土壁で瓦葺きならすべて「伝統木造」である。

設問 2

次のうち間違っているものはどれか。

- 基礎を固定しない建物では、直下型地震時に水平動は一瞬遮断される。
- 基礎と上部構造とを緊結しているか否かが、「戦後木造」と「伝統木造」工法の差異の一つである。
- 加速度が増大して、静止摩擦から動摩擦状態に移行すると、摩擦抵抗が急増する。



認定教材の設問への回答は、CPD 情報システムのページ

<https://jaeic-cpd.jp/>

にアクセスのうえ、お願い致します。

※不正解の場合は、単位に登録できない場合があります。

※自習型教材の選択欄における会誌『建築士』選択項目は、平成28年1月より建築士会員のみの表示項目になります。