

「土」からみる木構造

第4回

京壁から考える土壁の耐震性能

西澤英和 | 関西大学 名誉教授



はじめに

京都は天明8(1788)年の「団栗焼け」で二条城本丸や御所をはじめ洛中の8割が灰燼に帰した。さらに元治元(1864)年7月の「蛤御門の変」——「どんでん焼け」で市街地の800町、28,000戸が焼き尽くされ、東本願寺の阿弥陀堂や御影堂などの大建築も焼失した。このため、現在の京町家は幕末の動乱期を経て徐々に復興されたという歴史を背負っている。江戸期に遡りうる町家は5%以下と少なく、明治以降築百数十年の比較的新しい町家がほとんどを占める。

さて、京町家——日本的な都市型高密度住宅は、玄関と店や座敷や中庭などは江戸以来の美しさを保っているが、井戸が水道に、薪が都市ガスに代わり、水洗化が進んだので、通り庭の土間や台所は現代風に改修されてはいるが、木組や土壁には昔の手法が大抵残っている。

他の歴史的都市の庄屋格の民家や表店に比べると、京町家の部材はやや華奢な印象をうける。4寸程度の通し柱以外の柱は大抵3寸5分、貫は杉で幅5分、成3寸5分、小舞を絡める壁貫は幅4分が多い。貫は地・胴・内法の3段、壁厚は2寸2分が一般的。大黒柱もやや小振り内法は5尺7寸、大引天井もやや低い。京町家の木柄がやや細いのは、「蛤御門の変」で、長州藩が市中に火を放ったために洛中は焼土と化し、困難な経済状況下での復興を余儀なくされたことと無関係ではないのかも知れない。

京壁の下地について

各地の民家や町屋の土壁を眺めてみると、壁土や下地など素材は地域によってさまざまであるが、柱や梁、貫などの「木組」に「下地」を格子状に組み付けて、これらを植物性の紐で結わえたあと、土を付けて乾燥させるという手法はほぼ共通する。

要するに土壁は「土」と「下地」の2つの構造要素からなる「複合(composite)構造」とみることができるが、「土」については前回若干言及したので、今回はもう一つの要素——「下地」について、「京壁」を例に考えてみたいと思う。

ところで、土壁は下地材料が同じでも、小舞の搔き方、縄の結び方、土の付け方によって、力学特性は大きく異なることが知られている。そのため、今回は標準的な京壁下地の搔き方——「本四つ」について述べる。

「本四つ」下地について

京壁の重要な特徴は、壁厚を極力薄く施工することであろう。大阪では、柱は4寸角から4寸5分が珍しくないのに対し、京では3寸5分が一般的。それでも壁際の「散り(チリ)」は6分を確保するとされているので、土壁の厚みは $3.5-0.6 \times 2 \rightarrow 2.2 \sim 2.3$ 寸くらいに美しく納めなければならない。もっとも土壁の大まかな工程はどの地域でも同様で、

- ①壁貫の片面には横方向、もう一方には縦方向に竹の小舞下地を組み付け、
- ②次いで荒壁と中塗りを施して乾燥を待つ
- ③最外層に上塗りを施す。

あらゆる仕事と同様、壁下地にも上・並・下があり、図1に示す「本四つ」【図1】(真竹の四つ割を「間渡し」、下地竹は6ツ割)を基本に、「西京小舞」と言われる上仕事、中級の「堅四つ」や下の「並小舞」などさまざまであるが、割竹の表面を外に向けて、竹の内側を壁芯側に向けて搔きつける。そのため仕上がった竹下地は両面とも

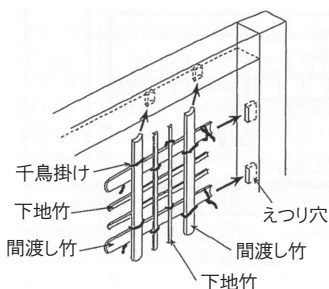


図1 「本四つ」下地

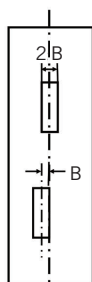


図2 柱芯と貫芯の関係

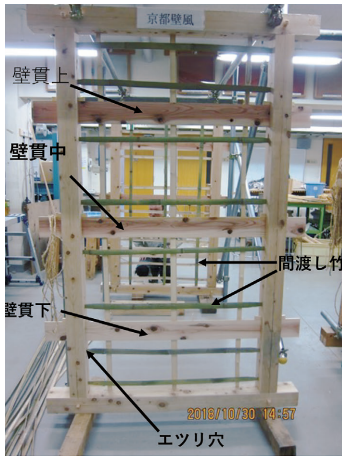


図3 3段の壁貫・間渡し竹



図4 下地竹(縦)の取付け



図5 下地竹(縦)と間渡し竹(横)

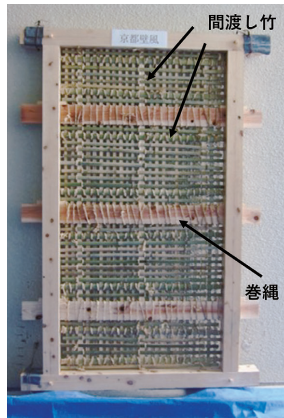


図6 完成した壁下地(室内側)

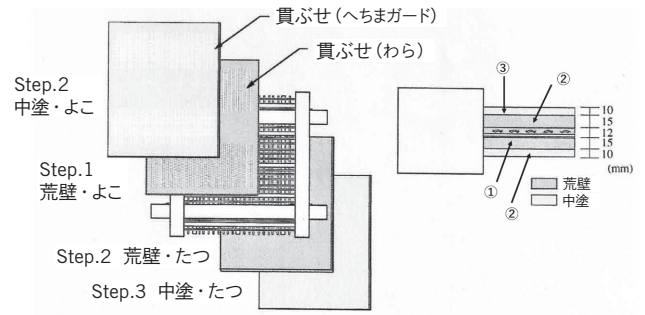


図7 中塗壁の分解図および断面図

方向の「間渡し竹」を介して柱に伝達させるのが定石である。また、下地竹は縄を結わえる際に指を通すので、中央の「間渡し竹」間に8本、端の「間渡し竹」と柱の間に2本ほど配することになる。

なお、「間渡し竹」と「下地竹」を荒縄で結束する際、一方向に巻き付ける「アサガオ」よりも、図1に示す「千鳥掛け」のほうが確りと組むことができる。

竹について

竹は3年から5年生の「真竹」もしくは「淡竹^{ハチク}」を用いるが、大事なものは「伐り旬」。京では昔から「木八竹九」と呼んで、木は旧暦8月、竹は旧暦9月——すなわち秋風が立つ10月頃から、年内に伐ったものを使う。晩秋から初冬の休眠期の竹は水を上げず虫もいないので、竹下地は湿気を帯びなければ何百年もの耐久性を示すが、年を越すと春芽が成長し始めるので使わない。これは木も同様である。

土付けについて

左官工事は下地に土が確りと喰いついて、必要な厚みを確保し、かつ仕事を手際よく進んで強靱かつ美しく仕上げるのが重要。人の目に触れるのはほんの数ミリの塗りではあるが、下地の土付けは壁の強度だけでなく、斑のない壁に仕上がるか否かに関わる重要な工程である。

土物で難しいのは乾燥収縮への配慮である。コンクリートやモルタルも乾燥収縮するが、左官土の収縮量は遥かに大きいので、寸法変化の読みが重要である。壁土など乾きさえすればよいとばかりに、一気に厚く付ける「ドカツケ」や、空調や強制換気に頼る「急ぎ仕事」は数百年ももつか、短期間に障害を発生するかの分かれ道になる。

下地には、下地竹を縦に配する側(縦壁)と、横方向に配る側(横壁)があるが、伝統家屋の壁を観察する限り、縦下地を外側に、横下地を室内側に向ける点については地域差はなさそうだが、土付けの順序は地域によって随分異なるようだ。

■裏返し

京都では室内側の横壁から土を付けるが、大阪は逆で外側の縦壁を先付ける。図7は京壁の標準的な手順である(図7)。最初に室内側の横木舞側に荒壁①を付けて、半月ほどおいて十分乾燥すれば、外に面する縦小舞側に荒壁②を付けた後、直ちに横方向の荒壁①の表面に中塗り②を施工する。その後、しばらく乾燥期間をおいて、最後に室内側の中塗り③を塗り上げるが、最初の層①は乾い

やや緑色を呈する。また京壁では「えつり穴」は角穴とし、割竹の先端をナタでやや丸みをとるが、丁寧な仕事では竹に釘穴を揉んだのち釘止めする。縄はやや緩めに絞った2分縄が多く、普通はウルチ・モチなどの稲藁であるが、上仕事では耐水性に優れたシュロや麻を使うが、最上級になるとワラビ縄を用いるという。

さて、普通、壁貫は図2の上のように、柱芯と貫芯を一致させて貫の両側面に巻縄を結わえて「下地竹」を搔くが、京壁では図2の下のように、4分(2B)の貫厚の半分の2分(B)だけ貫芯を柱芯からずらせて貫孔を穿つ(図2)。こうすれば、貫厚の内側に横方向の「間渡し竹」が収まるので、貫の両側面に「下地竹」を設置する場合よりも壁厚を薄くすることができる。

下地搔きの手順は、およそ次の通りである。

まず、壁内には幅4分の壁貫を図3のように上・中・下段に設置(図3)。壁下地は太めの「間渡し竹」と細めの「下地竹」の2種類を用いる。「エツリ穴」の幅は1寸くらいで、真竹もしくは淡竹を八ツ割もしくは六ツ割にして用い、「下地竹」は幅4〜5分ほどで「間渡し竹」の半割でよい。

次いで図4・図5のように縦の「下地竹」を搔くが、貫の芯は柱芯から2分のオフセットがあるので、横方向の「間渡し竹」は貫の面内に納まっている(図4・図5)。「エツリ」穴は両側の柱と上下の框や土台に穿ち、上述のように先端をやや削った「間渡し竹」を差し込む。縦横の「間渡し竹」は2分縄で結束するが、縦の「間渡し竹」に鉛直力が作用すると突っ張って座屈するため、上下のエツリ穴には遊びを設けるが、「下地竹」も壁止めの土台から浮かせて、壁の重量は横

表1 荒壁土と中塗り土の材料強度

種類	圧縮強さ (kg/cm ²)	曲げ強さ (kg/cm ²)	剪断強さ (kg/cm ²)
荒壁土	10.2	4.1	3.8
中塗り土	10.2	4.4	4.1

表2 各試験体の壁厚・断面積

壁仕様	壁厚 (mm)	断面積 (cm ²)
木枠に小舞のみ		
荒壁片面塗(横壁)	38	300
荒壁片面塗(縦壁)	38	300
荒壁両面塗	40	530
両面中塗(薄荒壁)	55	430
両面中塗	78	610

ているので吸水性がよく、②層以降は乾きが早い。この工程を「裏返し」と呼んでいる。

各層の厚さは貫に絡む部分が4分、木舞竹の外側が5分、内外の中塗りC・Dは約3分として、全体で2寸2分に収める。なお、貫表面の土付けに際して貫伏をいれる。これは貫の表面の土は厚みが薄く、割れが入りやすいため、喰いつきをよくするために鉋で貫に刻みを入れたり、貫周りの荒壁に長さ7寸～1尺のワラのほか、古蚊帳や和紙を塗り込めることが多い。なお、荒土は粘土性で強度は高いが、乾燥収縮も大きい。このため、中塗り土は大亀谷の新土に微塵スサと細砂を混練して使った。

京土壁の水平せん断試験

材料試験結果

構造実験の前に荒土と中塗り土の材料試験を行った。試験体の形状寸法は圧縮試験→6×6×6cm・曲げ試験→6×6×20cm・せん断試験→2×3×2cmの各3体とした。圧縮結果を表1に示す【表1】。圧縮強度は荒土、中塗りともほぼ同等で約10kg/cm²、せん断強度は約4kg/cm²であった。

試験の概要

図6に示すように柱と横材で構成された壁【図6】が水平にせん断変形する場合、縦横の貫で分割された内部の格子組も外周柱と同じ角度にせん断変形する。そのため、大型壁面と同一の地下や土付けを施した小型枠を用いて大型壁と相似なせん断応力場を再現することができる。このような方針で行った半間角の試験体の実験結果を紹介する。試験体の形状寸法は図8に示す通りである【図8】。柱は芯々距離約1mで、柱は3寸5分角の桧、貫は成3寸5分、厚み4分の杉材とした。枠は柱と同寸で楔を打ち込んでいる。

試験体は施工の各段階を再現するため以下の6種類とした。

- ① 枠・小舞のみ
- ② 片面荒壁塗(横壁)
- ③ 片面荒壁塗(縦壁)
- ④ 両面荒壁塗
- ⑤ 中塗り壁(荒壁薄塗)
- ⑥ 中塗り

完成後の壁面の厚さと平均断面積を表2に示す【表2】。

載荷試験方法

図9に実験セットアップを示す【図9】。試験体の上部に載荷梁を設

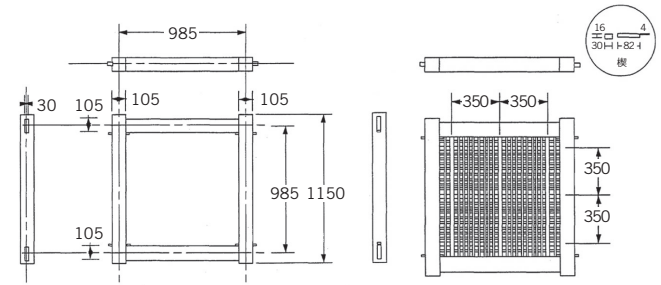


図8 試験体の形状寸法

置し、一方にピンとロードセルを設置して、電動ジャッキにより水平に一方向単調載荷した。また載荷梁の中央にローラーベアリングを介して油圧ジャッキで抑えて浮き上がりを防止した。

実験結果

■荷重変形関係

図10に6種類の試験体の荷重変形関係を示す【図10】。下軸は框の水平変位(cm)、縦軸は復元力(tonf)、上軸はせん断変形角で、最大層間変形角1/20(5%)までとした。

「木枠のみ」の反力は変形に伴って単調増加するが、一番上の「中塗り」は変形角1/30付近で約2.2tonfの最大荷重を示し、以降1/20まで緩やかに低下した。「両面(荒壁)塗」も同様である。

図10の復元力には木枠の水平抵抗を含んでいるので、すべての復元力曲線から「木枠のみ」の値を減じて再プロットしたものが図11である【図11】。これより以下の結論が得られた。

- ① 片面塗(縦壁)のほうが片面塗(横壁)に比べて強度は約2倍大きい。
- ② 両面荒壁と片面塗(縦壁)の強度はほぼ同等である。
- ③ 変形角2.5～3%で各土壁は最大耐力に達し、中塗り壁では約1,200kg/m、壁厚の薄い中塗り壁で750kg/m、両面荒壁塗で400kg/mとなった。
- ④ 表2に示すように、中塗りによって壁厚は約2倍になるが、荒壁両面塗が1/60→0.4tonfの耐力に達するのに対し、中塗りは1/33→1.2tonfで変形性能は2倍、強度は3倍に増加した。荒壁に生じた乾燥亀裂に砂やスサの多い中塗り土を鏝で入念に揉み込んで、強く鏝抑える結果、壁面の強度が大きく改善されるためと考えられる。
- ⑤ 中塗り壁は変形角 $\delta_p \rightarrow 1/33$ (3%)で $F_p \rightarrow 1,200\text{kg/m}$ の最大値を示した。この点Pから復元力が10%→120kg/m低下して1,080kg/mまで低下した点Qに対応する変位 δ_q を終局変形限界とすると、 $\delta_q \rightarrow 4.2\%$ となる。

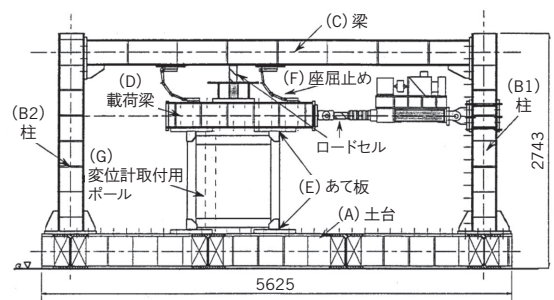


図9 水平載荷実験セットアップ図

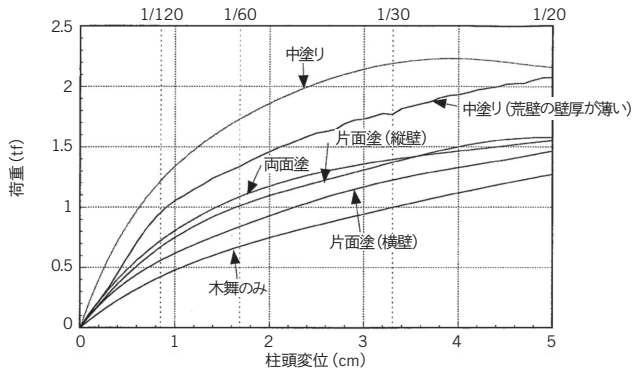


図10 6種類の試験体の荷重変形関係

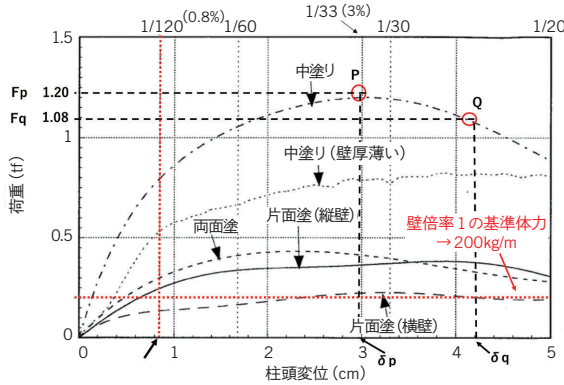


図11 すべての復元力曲線から「木舞と小舞のみ」を減じて再プロット

⑥基準法施行令ではa prioriに変形角(1/120)→約0.8%時の復元力をもとにしており、中塗り壁の場合、壁倍率1.0で、強度を200kg/mと定めたいが、実際に京壁をつくって実験すると、0.8%変形時の強度は約800kg/mと4倍、最大耐力は3%変形時で1250kg/mで約6.3倍など実際の土壁の性能は施行令の数値を遥かに上回っている。

■亀裂分布

両面中塗り壁の最終ひび割れの状況を図12に示す【図12】。ひび割れは右上と左下の2カ所の隅角部を結ぶほぼ45度の方向——すなわち斜張力に直行する方向に伝播し、圧縮変形量は隅部付近のチリの圧壊によって安定的に吸収される。このために、5%の最終変形時においても顕著な面外変形や剥離は認められず、チリ切れや圧壊は簡単に修理復旧できる程度に収まった。土壁の水平力の抵抗機構をモデル化したものが図13である【図13】。ほぼ45度の方向の圧縮束の形成によって、ハウトラス(Howe truss)のような応力場が形成されることがわかる。

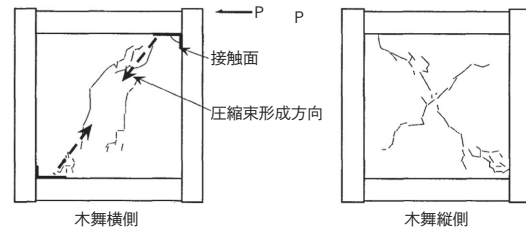


図12 試験体の最終ひび割れ状況

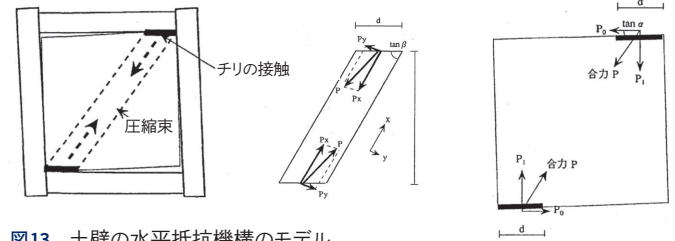


図13 土壁の水平抵抗機構のモデル

結語

近年さまざまなところで伝統的な土壁の構造実験が行われ、多数の学術論文が公開されているが、施行令のような低い数値はまず見当たらない。私どもの場合は伝統左官技能者の指導のもと、学生と私という素人の見習いが制作したのであるが、土壁の性能は基準法の告示の規定値を遥かに上回っている。壁厚の薄い京壁でこれほどの性能が得られるのであれば、それよりも厚い一般的な土壁を熟練の技能者が施工すれば、その強度はさらに大きくなることは容易に想像される。

民家や町屋などの伝統木造家屋が度重なる大地震に耐えて現在残っているのは、土壁などの伝統建築技法の優秀さを雄弁に物語る。なお、片壁は「裏返し」するだけで、土壁の耐震性は飛躍的に向上する。手軽でコストのかからない我々庶民の耐震技法として広く活用したいものである。

にしぎわ・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

自習型認定研修の設問

設問1

壁下地の基本仕様の名称はどれか。

- 堅四つ
- 本四つ
- 西京小舞

設問2

6種類の試験体の荷重変形関係から得られた結論で、間違っているものはどれか。

- 片面塗(横壁)と片面塗(縦壁)の強度は同等。
- 両面荒壁と片面塗(縦壁)の強度はほぼ同等。
- 変形角2.5~3%で各土壁は最大耐力に達する。



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月より建築士会会員のみの表示項目になります。