

伝統木造建築の新しい耐震建具の研究開発

片岡靖夫, 望月義信*, 吉田貴史*, 小岱冬樹**, 白井健介**

Development of Earthquake-Proof Fittings of Traditional Wooden Buildings

YASUO KATAOKA, YOSINOBU MOCHIZUKI*, TAKASI YOSIDA*, FUYUKI KONUTA**
KENSUKE SIRAI **

Abstract: There are many old traditional wooden frame structures that were specified as cultural heritage or shall be specified as Japanese important buildings near future. But there are many buildings that do not have good performance against seismic action. Purpose of the investigation is to develop the earthquake proof share fittings and to apply them to the traditional wooden structure such as Japanese Buddhist temple. Characteristics of our investigation are to propose new earthquake-proof fittings that can resist against big earthquake instead of shear wall or shear structural elements. Capacity of the earthquake proof fittings was testified by cyclic lateral load. The earthquake proof fittings were used to the reinforcement of the two Buddhist temples. .

Keywords : *Traditional wooden building, Earthquake proof, Fitting, Door, Reinforcement, Shear diaphragm*

1. 序

建立からの経年数が長い社寺建築など、伝統木造建築は必要耐震性能を保有していないものが多い。著者の濃尾地震（1892年、M8.2）による社寺建築の被害調査報告¹⁾によると、岐阜県の調査寺院本堂の総数140棟の中で、壊倒数は57.1%、愛知県は243棟の内、倒壊数は61.7%であった。寺院建築は建立後20年前後までは接合部の強度と靱性が高いので、大地震によって大変形が生じても倒壊などの大被害は生じ難いが、経年変化が生じたり再建された社寺建築は必ずしも耐震性能が高くない。

また、建物の修理や改修を行ってきた社寺建築は従来の建築様式を踏襲していることが多く、今後の地震に対しても同じような被害が生じる可能性が高い。これは仕口、土壁、小壁などの構造要素の経時変化による強度と靱性の低下および構造要素の平面的な偏在が原因になる。この耐震性能の低下の対策として外周部に耐震壁を設置する耐震補強は多くなされている。しかしこれは建物の様式の変更を意味すると同時に開口部を閉鎖することで従来からの儀式的形態や機能に支障をきたすことがある。

伝統木造建築の耐震補強は、従来からの建築様式を変更することなくかつ内部及び外部の意匠を変えないで行なうことが理想である。このことは日本の伝統木造建築の後世への正しい継承を意味するからである。本提案はこの理想を実現するために、伝統木造建築に存在する框戸／扉、又は採光戸に耐震性能を保有させ、それらが可動かつ脱着可能な仕組みを軸組みに付与することである。したがって、この

* 伊藤平左エ門建築事務所 **工学部建築学科学生

方法は重要文化財建造物にも適用できる耐震改修法である。何故なら、取り替えられた従来からの建具は保存しておき、将来の解体修理の時に再設置して様式の復原ができるからである。このような本堂外陣外周部の建具に関して、常時開閉が可能な状態にするものは向拝に面する数枚の建具に限られている。つまり、それ以外の建具は年に数度の行事の時に開閉できればいいので、それらに耐震性能を付与すれば本堂の地震時保有耐力の向上が期待できる。

以上の背景のもと、水平抵抗力を保有しかつ必要なときに脱着可能な建具、あるいは開閉可能な建具を開発して、それを軸部に配置して建具の負担せん断力を軸部に伝達するシステムを構築することを研究の目的とした。

2. 耐震建具の開発

建具を耐震要素と評価する新しい考え方を実用可能にするために、著者等が開発した3形式の耐震建具を示す。これらは、重要文化財級の社寺建築に用いられていることが多い框戸／扉、採光を必要とする格子戸（可採光耐震建具）、そして建物に付属する収納庫の扉、の3種類である。

2.1. 耐震框戸／扉の提案

伝統木造建築の外周開口部は建具が二重になっていることが多い。室内側の障子戸やガラス戸の外側に雨戸や框戸、あるいは木の扉が設けられている。これらの外周部の建具を耐力壁にすることで建物の耐震性能が向上することに着眼した²⁾。さらに、これらの耐震框戸／扉は建物外周部に配置されるので弾力半径が増大し保有耐震性能はより向上する。この耐震框戸／扉は構造用合板を内蔵したものであり、その仕様と取り付け詳細を図1に示した。耐震框戸と耐震扉の構造仕様は同じであるが、耐震扉は4個の重量金属扉用の蝶番で柱又は縦材に取り付けせん断力の伝達を可能にする。

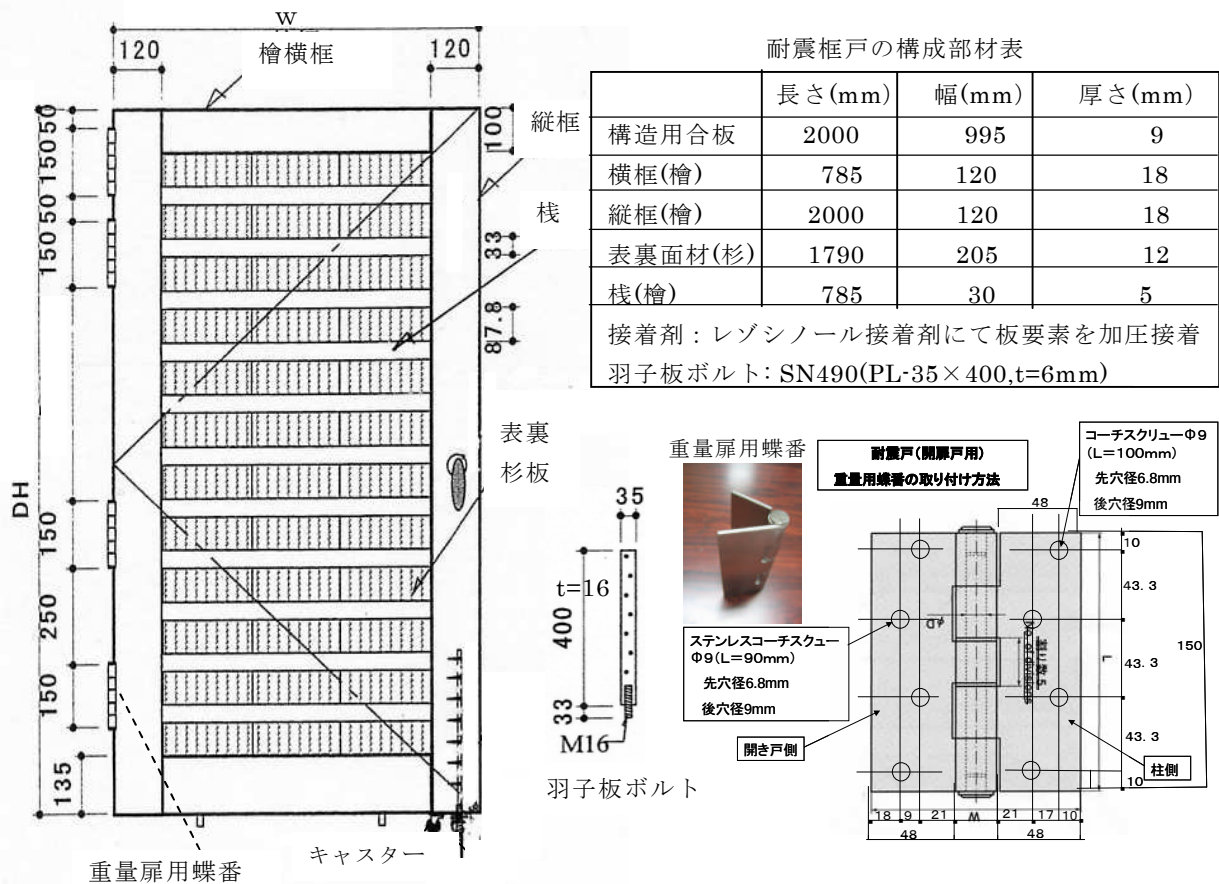


図1. 耐震框戸／扉の仕様

2.2. 耐震性能を有する可採光耐震建具

特に採光を必要としない重要伝統木造建造物には耐震框戸／扉が多用されている。しかし、一般の寺院本堂では法要が日常的に催されるので採光を必要とするものが多く、耐震補強によって開口部が閉鎖されて本堂内が暗くなることを避けたいという要望が強い。そこで、ガラス戸や障子戸のように採光が可能でしかも耐震性能を有する建具を考案した³⁾。建具の部材構成は、心材に格子状の薄鋼板 ($t=2.3\text{mm}$) を用い、格子内にアクリル板を嵌め込み鋼板とアクリル板の切り口接触部はウレタン樹脂で接着する。そして格子の表裏に桧杵材を接着するが、鋼板と桧材の接触部はウレタン接着剤で接着し、桧とアクリル板の接触部はレゾシノール接着剤で接着する。さらに、格子状の棧の交点には鋼板を貫通するタップネジ ($\phi 3$) を用いて接着面の脆性的な剥離を防ぐ工夫をした。戸の腰部は桧の仕上げ材を貼り付け舞良戸の意匠にする。両引きの戸が重なる縦框にはせん断伝達のための錠を4箇所取り付け、柱との戸当たり部には4個の桎のダボを設ける。そして横框と戸はフランス落しで戸の水平移動を拘束する。同時に鴨居と敷居には戸の横移動拘束材を嵌め込む。この可採光耐震建具の詳細は図4に示す。

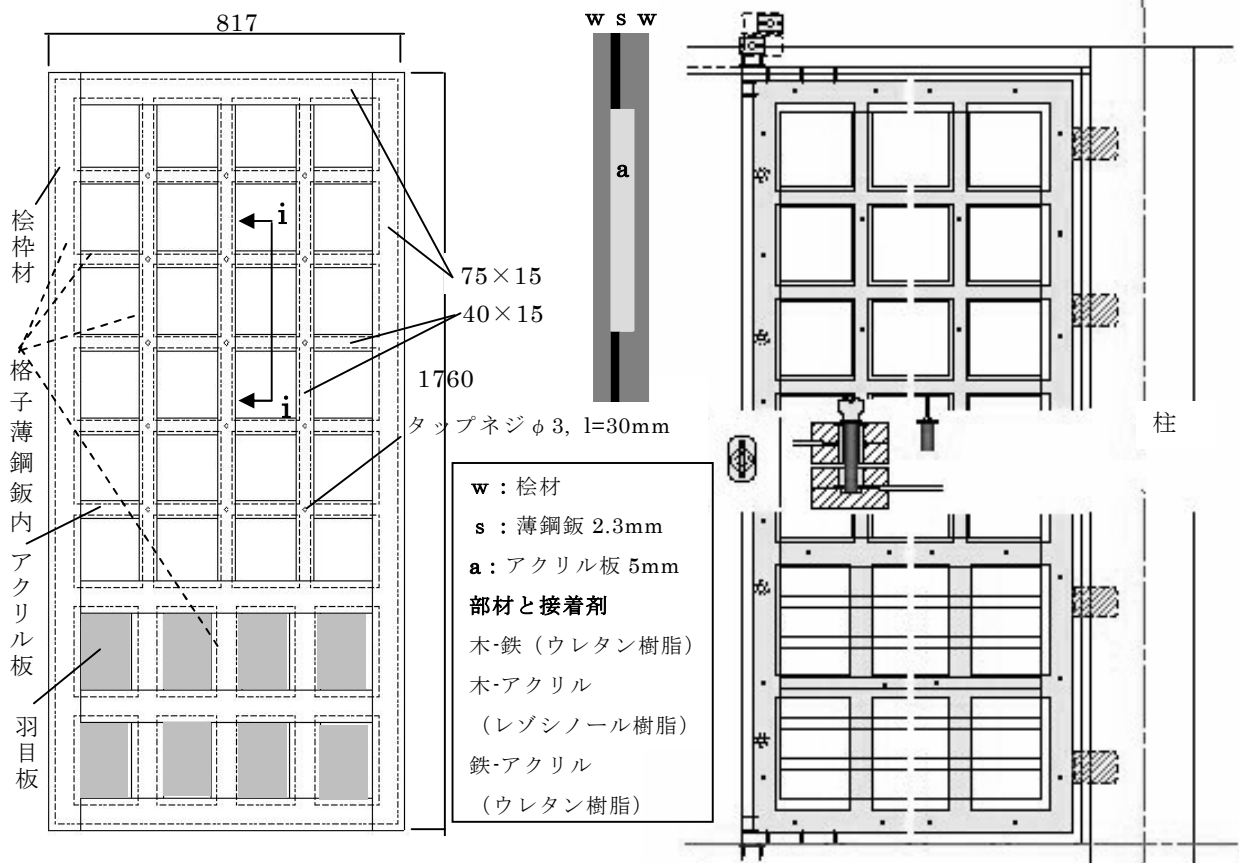


図4. 可採光耐震建具の仕様

可採光耐震建具が必要耐震性能の発揮するためには、耐震建具を組み立てる部材相互の接着性能が保証されなければならない。そのために耐震建具の構成要素である桧と鋼板、鋼板とアクリル板そしてアクリル板と木材、の適切な接着剤を定めるため、エポキシ系接着剤、ゴム系接着剤、ウレタン接着剤、レゾシノール接着剤の接着性能試験を行い、その結果³⁾ からウレタン接着剤とレゾシノール接着剤を用いることにした。そして実大試験体を作製して水平方向正負繰り返し加力試験を行った。実験結果は図6に示した。履歴曲線はスリップを有する原点指向型であるが、これは鋼板が棧材と框に内挿されたサンドイッチ形式であるために鉄骨構造要素の変形特性が顕著に表れたものである。P- Δ 曲線から、1/50rad. までは線形であり、その後は框材の局部座屈が生じて耐力一定の変形性状を示した。

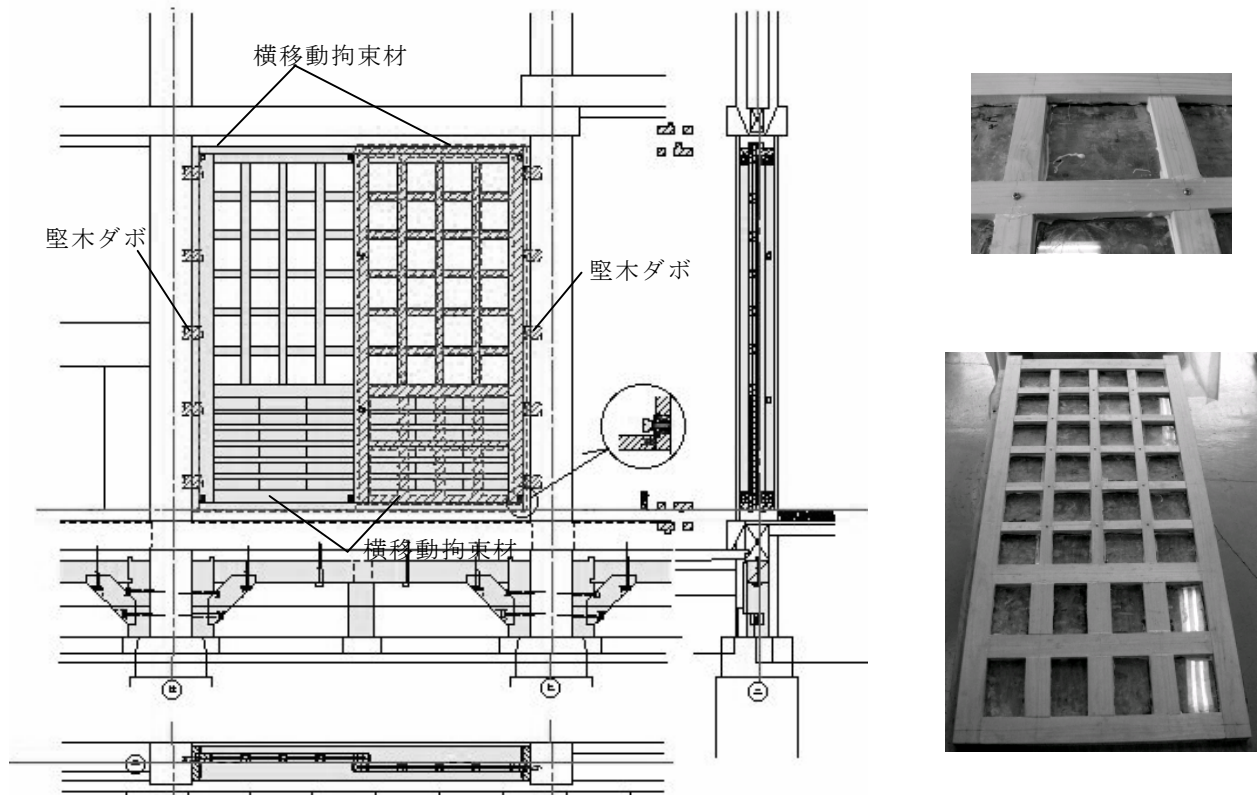


図 5. 可採光耐震建具の試験体（右写真）と取り付け詳細（左図）

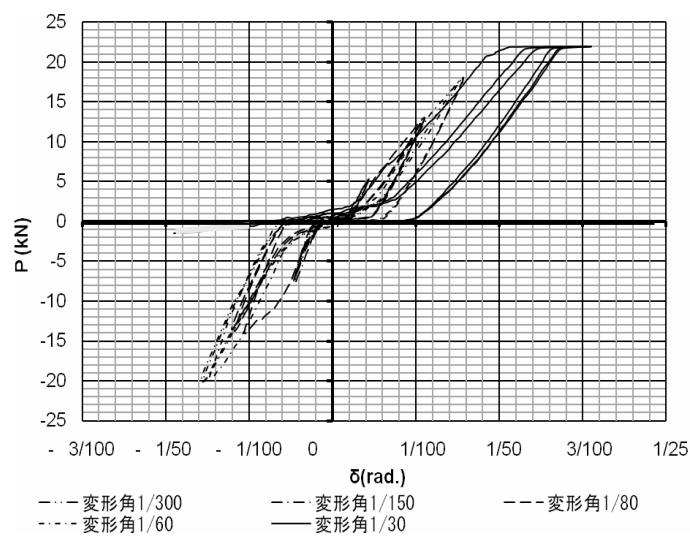


図 6. 可採光耐震建具 (P—Δ)



写真 1. 可採光耐震戸設置予定箇所
(浄土真宗再来寺本堂改修一名古屋市)

2.3 耐震性能を有する収納扉

寺院本堂の須弥壇とその背後にある後堂の境には前面土壁があり、その下部に床位置から1 m位の高さの扉がある。扉の内側は仏具や調度品の収納庫になっている。土壁下部に収納庫の開口があるので、土壁の水平せん断力の伝達が途切れて耐震性能を十分に発揮できない。そこで、その両開の扉を耐震性能を保有する扉にして、土壁と耐震扉及び耐震扉と軸部のせん断力の伝達を可能にする機構を考案した。

この両開きの耐震扉⁵⁾は両サイドの柱と貫及び大引きなどの横架材に囲われた部分に組み込まれる。扉は縦横の舞良棧に構造用合板（ア 9mm）を釘打ちしたせん断抵抗要素であり、扉と縦框及び横框の接合は杉材の圧縮ダボ（φ8）で接合したタイプ A と構造用合板を框の部分まで広げて釘打ちして一体にしたタイプ B の2種である。この両開きの扉は縦横の框と一体になって開閉するものである。したがって、B 材と C 材から框への地震せん断力の伝達は両者を結ぶ可動の接続ダボ（樫材）を介して行われる。上下の樫材の接続ダボ J1 は横框に固定されており、扉を閉めた時に横架材 B の凹部へ滑り込み両者は嵌合する。接続ダボ J2 はフランス落し形式で両材の柄穴を上下にスライドし、扉を閉める時にロックするようにしてある。扉は重量扉用蝶番（S）を用いて柱に取り付けせん断力の伝達を可能にしている。

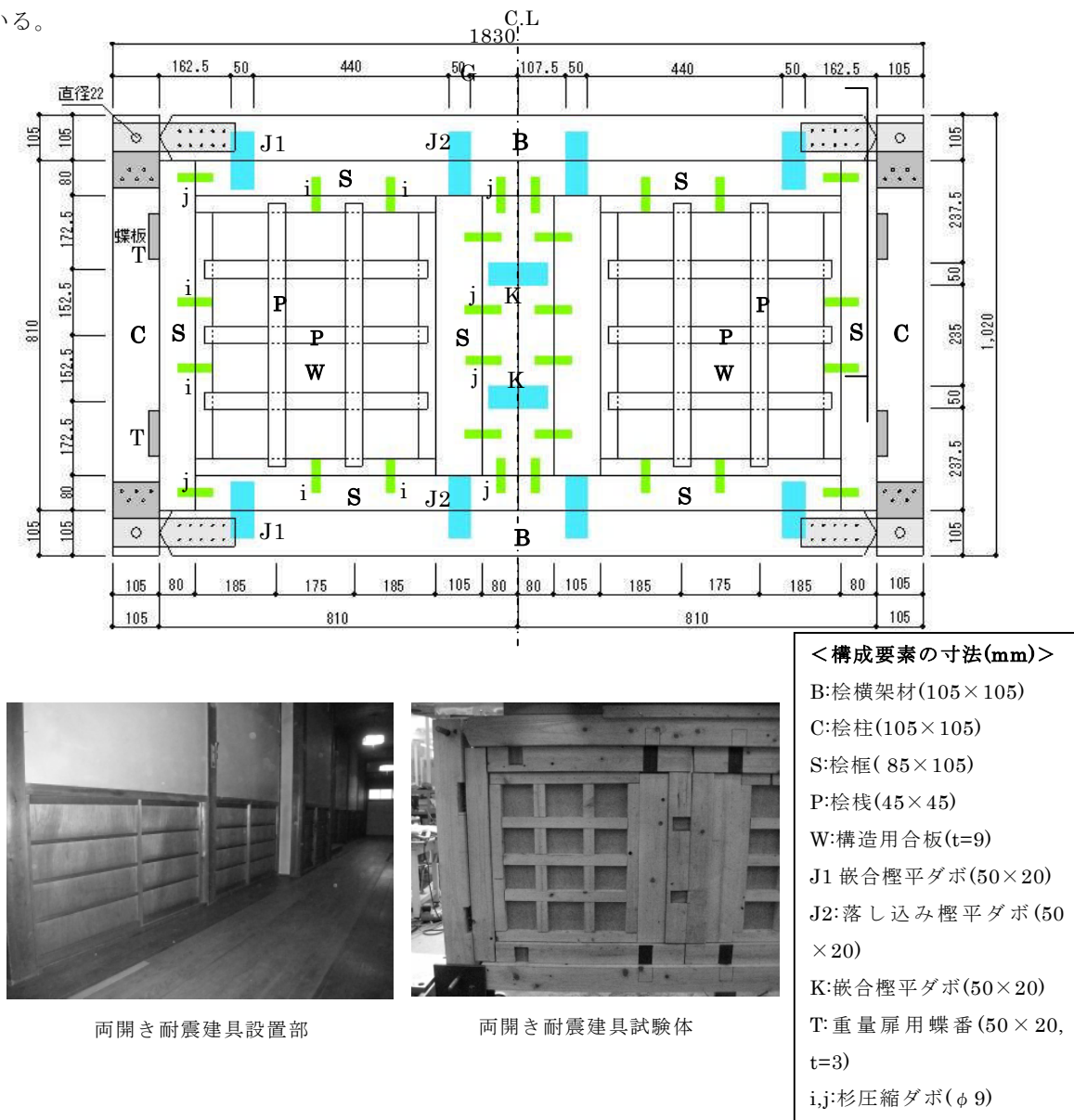
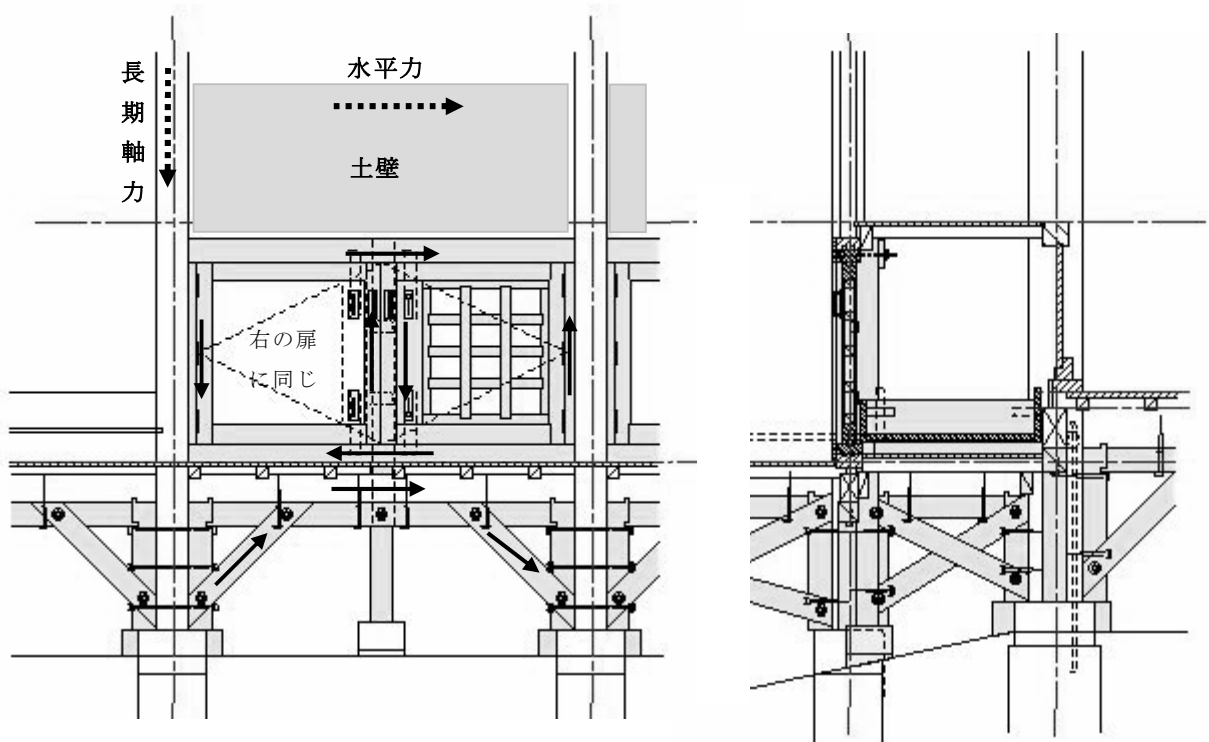


図 7. 収納庫両開き耐震建具

この建具は、これを設置する場所の上部にある土壁とセットで地震せん断力に抵抗するので、土壁と同等かそれ以上の耐力を保有していること、そして建具と建具取り付け架構の接合要素の強度が保障される必要がある。図 8 に、建具上部の土壁から基礎への地震せん断力の伝達を示した。その性能試験のために、建具と架構を合わせた試験体を作製して正負繰り返し加力試験を行った（図 7 の右の写真）。

図 9 は両開き耐震建具 1 セットの試験体の加力試験の結果である。図 9 左は建具の構造用合板と栈材を釘打ちし、栈材と框材は杉圧縮ダボで接合した試験体の $P-\Delta$ であり、図 9 右は構造用合板を框材と釘打ちした試験体である。杉圧縮ダボによる試験体は土壁の強度より小さいので扉の性能を十分に発揮できなかった。框と構造用合板を釘打ちした試験体は土壁の強度より高いので、土壁と耐震扉が一体になった耐震要素として評価できる。



15 図 8. 両開き耐震建具—基礎への地震力伝達の仕組み

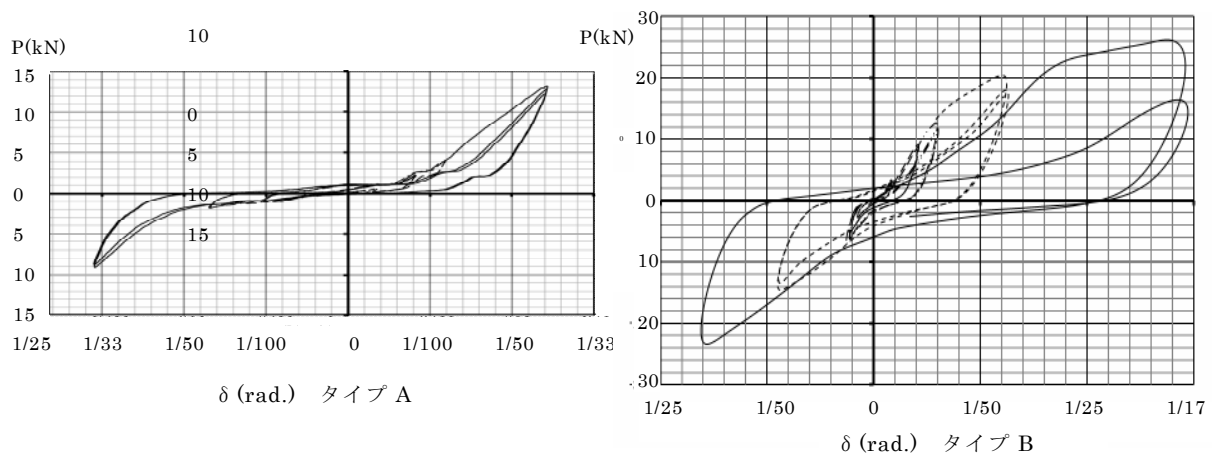


図 9 収納庫両開き耐震建具 ($P-\Delta$)

3. 耐震建具の寺院本堂への適用

3.1. 浄土真宗正徳寺

本研究で開発した耐震框戸／扉を浄土真宗日夜山正徳寺の耐震改修への適用を示す⁴⁾。同寺は東京の新馬場駅の近くにある。参道から山門を潜り、右手に経蔵、その先に庫裡、正面に入母屋の瓦屋根を頂いた本堂がある。向拝と浜縁に続く内部は、本山東本願寺と同形式で、外陣、柵内、左右の余間と内陣、裏の後堂、脇の講部屋で構成される。規模は、床面積 79.17 坪、雨落面積 98.1 坪、床高 1.55m、桁高 5.31m、最高高さ 10.87m。構造用材は、内陣廻りの七寸径と柵内の一尺径の丸柱が檜で、他の六寸角柱は栂もしくは桧が使われている。建立は棟札に明治 40 年（1907）12 月 3 日に上棟とあり、竣工は翌年と推定する。正棟梁を伊藤満作が勤め、権棟梁を長男の伊藤重平が担った。伊藤満作は、八代伊藤平左エ門守富の養子で、明治 18 年（1880）には、東本願寺両堂再建新始式に大師堂棟梁九代平左エ門守道に従い鉦納役を勤めた。

築 15 年目に関東大震災が起こる。南東隅や向拝の柱脚が 1 尺前へ動いた、とは住職が先代から伝え聞いている。被災後、修理を行っているが、軟弱地盤にも関わらず被害が比較的軽度であったのは、今でも頑強な版築地業が本堂の下に成されていたためだ。正徳寺は文化財指定は受けていないけれど、盆暮れ正月お彼岸はもとより、参詣者が平日でも絶えない街中の寺である。

3.2. 改修工事前の本堂の状況

平成 9 年（1997）から翌年にかけて実測調査と振動実験を行った。本堂の状況は、外陣廻りの柱が約 1/100rad.内陣側に倒れ、向拝では約 1/50rad.傾いていた。床下は、内陣と後堂廻りで柱脚が裂け、礎石からずれており、関東地震の痕が生々しい。古い白蟻害痕があり、床の不陸は、内陣で最大三九mmに及んでいた。過去の部分的な調整修理のために、むしろ不陸が拡大していた。小屋裏は、縦横の松丸太の地組は堅牢だが、転びや緩みは経年相応にあった。震災後に挿入された筋違も取付方法が不十分だった。屋根は、疎らな野地板に木っ端の上桟瓦葺きで、土葺特有の波打ちがあった。壁は、本堂前面は小舞土塗下地漆喰塗で、チリ切れがある程度。後面のモルタル外壁は大きな割れはないが、建物を部分的に固めてしまっていた。同時に、耐震性能調査の結果を基礎データとして、構造の立体的解析を行い、水平変形性能が求められた。現状の耐震性能は、M八クラスの大地震時に安全とされる強さを基準にすると、南北方向で 67%、東西方向で 51%の強さであった。関東地震の時に目立った被害がなかった建物なので、築後 90 年間で約 40%の強度の低下を生じたことになる⁶⁾。耐震性能低下の要因は、経年変化による構造要素の仕口と小壁、土壁の強度、剛性、そして靱性の低下と判定した。従って、耐久性復元修理と耐震補強を同時に行えば、耐震性能は大地震に対して必要な耐震性能を満たすことが明らかになった。

3.3. 耐震性能を有する耐震建具の組み込み

後ろ側に比べて極端に壁量の少ない外陣外周部の耐震壁新設に対して、「これまで同様照明に頼らず、障子を透す自然光でほのかに内陣が浮かび上がるような空間が正徳寺に相応しい」、また外陣外周部は「法要儀式の際に出入りをしたいので、柱間を壁で潰すのは困る」と寺院側の強い要望が示された。伝統建築の様式と機能を変えずに、経済的に本堂建物の耐震性能を向上させる、という命題が耐震戸／扉の開発の発想を促した。

命題の実現に向けて、本堂正面中央の 15 尺の柱間に納まる建具の構成にヒントを得た。柱付きの舞良戸は内法溝にしっかりと嵌って動かない。見込厚 50 mm の舞良戸が、建具でありながら実質的に柱間を支えていた。すなわち、耐力壁に代わる耐震戸／扉で耐震補強をする基本構想が固まった。耐震戸は性能を発揮する上で柱芯が望ましい。また、施錠や網戸設置の要望がでた。各条件より、外側の板戸は長押に納めることにした。施錠は障子と耐震戸で締め、網戸は耐震戸と同列溝に嵌める。利用上も以前と

変わらない。耐震戸と軸部の構造的な連結、そして地震せん断力伝達を可能にするための取付方法、床下の対策などについて検討した。

3.4. 耐震戸の基本構成

耐震戸の意匠は、これまでに倣って舞良戸とした。構造用合板を心材に鏡板、縦框、上下棧をレゾシノール接着剤で圧着し、舞良棧は吸付棧で鏡板に取り付ける。縦框の両木端下部に羽子板ボルトをコーチスクリューで仕込み、木端は化粧埋木した。羽子板ボルトで下方へ引っ張り、建物の床下横架材に緊結する。

耐震戸は、特別な儀式や大地震被災後の復旧修理のために取り外しを想定した。維持管理には、新規挿入材の痩せに対して増し締め調整を可能にしておく必要もある。そこで、羽子板のボルトを床上で分割、長さ 50 mm のナットで連結し、耐震戸の下棧角の欠込み部分で、手で回し取り外し操作を可能にした。八双形状の化粧金物で隠れる欠損部には、角パイプを挿入し水平力を受けた時の補強とした。

耐震戸に作用する地震水平力は、縦框の軸力による偶力と釣り合う。羽子板ボルトを介して伝達する引張力は、床下横架材で抵抗する。そのため、既存の腰貫に補強横架材を圧縮ダボ@150 で縫い合わせ、曲げ強さ及び撓みに対する抵抗力を強化した。補強横架材は、柱にあご掛けと通しボルトで固定する。圧縮ダボは、杉材を 60% に圧縮した径 18 mm の丸棒で、湿気を吸収して繊維と直行方向に復元するため、将来横架材に亀裂を起こさないよう施工時には打ち込む向きにも注意を払った。耐震戸に作用する圧縮力は、地覆に束立てをして束石に伝達する。耐震戸の軸力は、上部の鴨居、内法長押そして貫の三種類の横架材へも伝達させるため、それらの下面から圧縮ダボを打ち込み、強度と剛性を高めた。水平力を受ける耐震戸の滑りは、上下内法二箇所に沿わせた移動拘束材を耐震戸の縦框と柱の間に嵌めて止める。

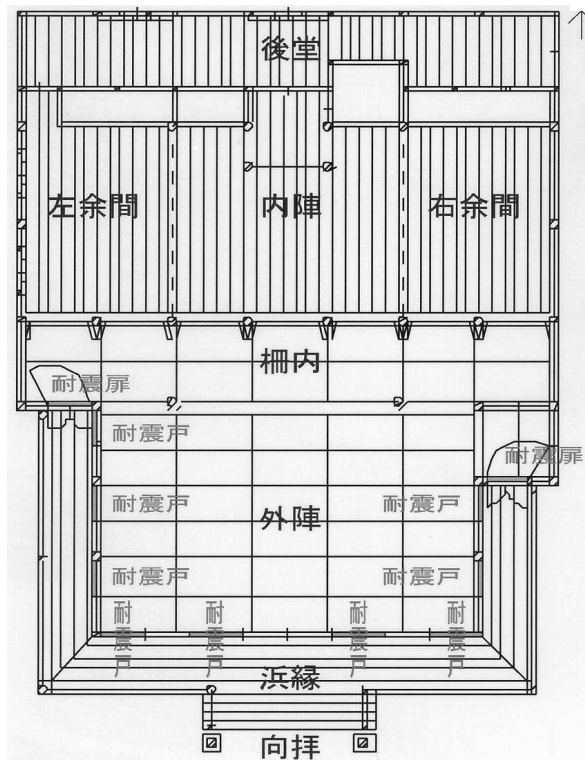
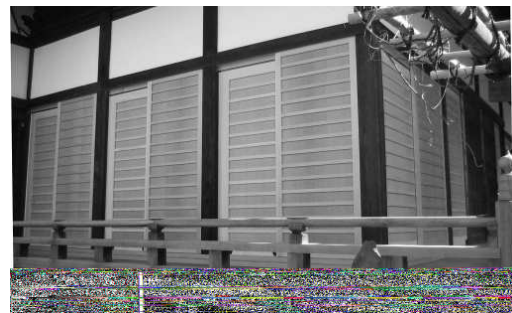


図 10. 正徳寺外陣周部の耐震框戸／扉の配置



— 一向拝面の框戸（上）と外陣外周部の框戸（下） —

写真 3. 耐震框戸組み込み完成外観

移動拘束材は、網戸の納まる内法材も兼ねた。耐震戸の前後方向の転倒に対して、鴨居にアングルを取り付けた。耐震戸との間には二mm程度の隙間を確保した。柱付きに見付二五mmの桧の鉛直材を入れ、深さ5mmの溝を突いて耐震戸を嵌めた。これは、経年変形している柱に耐震戸を建て付ける際の調整代の役割もする。耐震戸の鴨居は、内側の障子の鴨居に別材で組み込む。下部は、足元長押を内側に伸ばして敷居とし、障子の敷居とは縁を切った。何れも修理時の取替材を最小に抑え、かつ耐震戸の金物を内観には極力見せない配慮をしたものである。

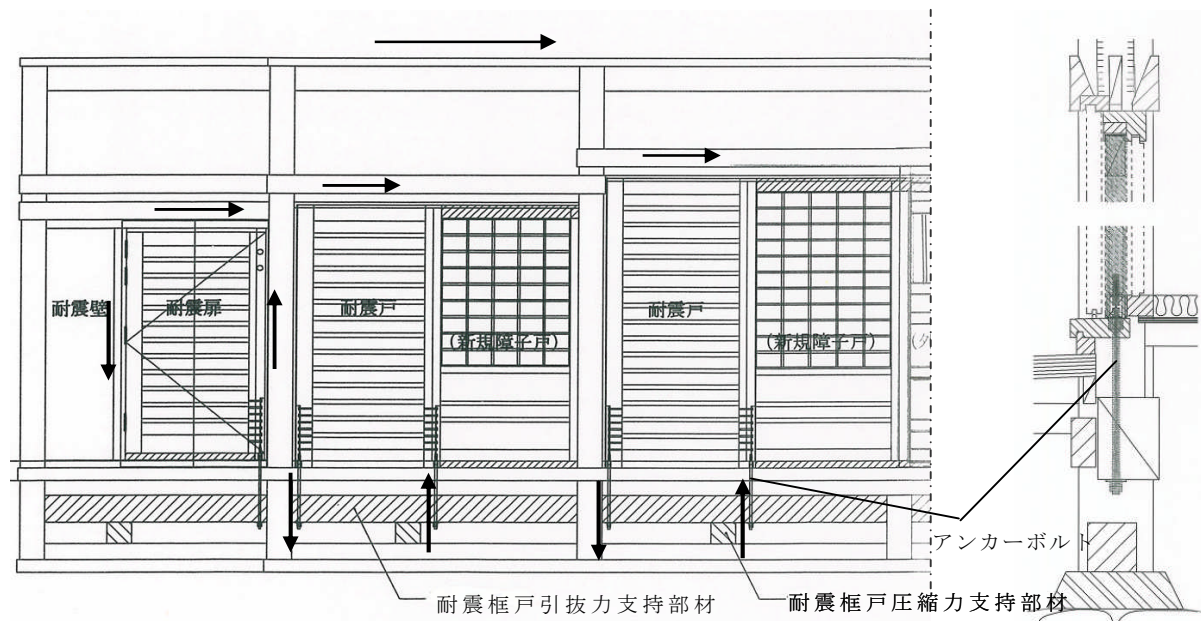


図 11. 外陣外周部の耐震框戸の立面／断面詳細図



写真 4. 耐震框戸／扉の開閉の仕組みと活動拘束要素

全ての構成部材と取り付け位置が構造性能に影響するため、意匠や納まり、製作方法、取付工事の各業種工程、分担に至るまで、決定には度重なる詳細な検討打合せを要した。

寺院より柵内と浜縁を一巡するお稚児行列などの式典をやりたい、という新たな要望が出た。年に一度、万が一その時に大地震が来たら、本堂の耐震性能は壁量としては充分であるものの万全とは言い切れないことを説明した上で、浜縁突き当り部分二箇所の耐震戸を開閉できるよう検討した。耐震戸は一

枚当たり重さ 30 kg を超える。両下端のナットは外せても耐震戸を持ち運ぶのは困難だ。そこで、柱側の羽子板ボルトを重量扉用の蝶番四個に変えて、内開きの耐震扉に変更した。戸先には耐震戸同様、羽子板ボルトを仕込み、床下に補強横架材を入れて束立てをする。扉の下端と敷居との間に、別材の無目材を差し入れ、開閉時に容易に取り外せるようにして、耐震扉の軸力を床下へ伝達する。戸当りにインサートを仕込み、戸先側縦框の上部をボルト 2 本で止め、前倒れを防止した。外部は、既存の板戸をそのまま残しているので、通常は内部からしか耐震扉は見えない。開閉可能にする所要時間は、転倒防止ボルトと化粧金物の取り外しに手間が掛かり、1箇所 20～30 分である。

4. 結論

伝統木造建築で文化財に指定されているものは多い。また、将来文化財に指定される可能性のある建物も多い。そのような建造物は従来の構造を変更することはできない。変更する場合は、将来解体修理などの大規模修理のときに、変更部分を容易に除去できる方法でなければならない。本論で提案した方法は構造と工法を変更しないで耐震性能を向上できるので、従来の工法の変更にはならない。耐震建具を取り付ける場合、その建具は個別に保存しておけばよい。このような理由から、本論の耐震建具は文化財建造物をはじめ伝統木造建造物全般に適用できると方法であると考えている。

謝辞

本研究の耐震框戸／扉の研究と実際の耐震補強の開発を担当した中山有子氏は平成 21 年秋に若くして逝去した。この耐震要素が実現したのは同氏の大きな貢献があつてのことであり本論文を同氏に捧げる。そして、本論の 3 章 耐震建具の寺院本堂への適用、の多くは同氏によるものである⁴⁾。

なお、本研究の可採光耐震建具と耐震扉は中部大学総合工学研究所 平成 21 年度の第 5 部門の援助、及び西来寺の奨学寄附金を受け遂行されたものであり、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 片岡靖夫, 桜井裕巳: 寺院本堂の構造調査と構造特性, 日本建築学会情報システム利用技術シンポジウム論文集、21 号 pp. 49-54 (1998 年)
- 2) 片岡靖夫, 中山夕子: 伝統木造建築の耐震性能向上のための耐震框戸／扉の提案、日本建築学会大会学術講演会梗概集 (2006 年 9 月)
- 3) 片岡大樹、小岱冬樹、松本雄太: 伝統建築の耐震要素の研究開発、中部大学建築学科卒業研究論文、(2010 年 2 月)
- 4) 中山有子、片岡靖夫: 正徳寺修理・耐震改修設計図書、(2007 年)
- 5) 望月義信、片岡靖夫: 西来寺修理・耐震改修設計図書、(2009 年)
- 6) 片岡靖夫: 正徳寺耐震性能調査報告書、東京都浄土真宗正徳寺、(1998 年)